3/97

Experimenteren met de universele analoge trainer

Inhoud

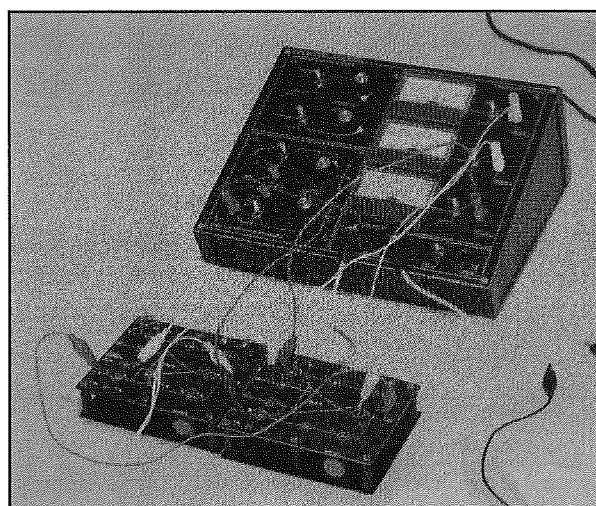
3/97.1

Inleiding

Al experimenterend leren

In dit deel van "Hobby Elektronica & Actueel IC-handboek" gaan we u, aan de hand van de in hoofdstuk 4/7.43 beschreven "universele analoge trainer" in een dertigtal hoofdstukjes spelenderwijs vertrouwd maken met zowat alle toepassingen van operationele versterkers, die u maar kunt bedenken. De eerste hoofdstukken zullen voor de meeste lezers misschien gesneden koek zijn, maar naarmate onze experimenten vorderen zullen ongetwijfeld schakelingen rond op-amp's aan de orde komen, waar u nog nooit van gehoord heeft.

Alle experimenten worden opgebouwd op maximaal twee van de in hoofdstuk 4/7.43 beschreven universele experimenteerprintjes, zie figuur 3/97.1-1. Op iedere print is al een standaard op-amp van het type 741 aanwezig. Uiteraard kunt u de beschreven schakelingen zonder meer ook rond andere (modernere) typen op-amp's opbouwen in uw eigen schakelingen. Omdat op-amp's, op dit niveau, vrijwel identieke eigenschappen hebben, zullen uw schakelingen gegarandeerd werken.



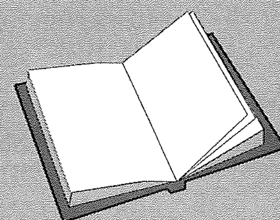
Figuur 3/97.1-1: Experimentele elektronica met onze universele analoge trainer.

Wat is een op-amp?

Overbodige vraag, misschien, maar een serie zoals deze hoort nu eenmaal met het antwoord op deze vraag te starten.

En, wie weet, misschien steekt u er toch nog iets van op. Een operationele versterker is een geïntegreerde schakeling,

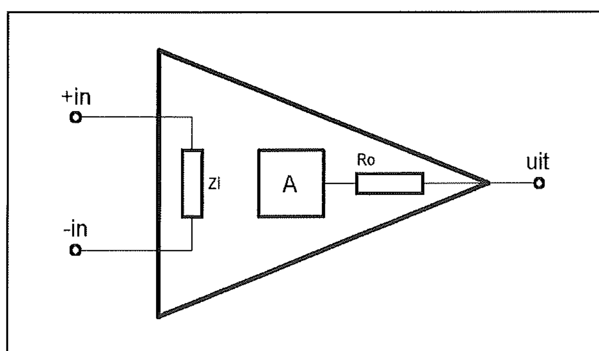
LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12
Hoofdstuk 4/7.43



97.1 Inleiding

opgebouwd uit weerstanden, dioden, transistoren en soms een condensatortje, die door haar interne structuur ideaal is voor het versterken van spanningen.
Naast de noodzakelijke voedingsaansluitingen en enige hulpaansluitingen heeft een op-amp steeds **twee ingangen** en **een uitgang**. Eén ingang noemt men de niet-inverterende of positieve ingang, de ander is de inverterende of negatieve ingang. Een op-amp is in wezen een verschilversterker: hij versterkt het spanningsverschil dat optreedt tussen zijn beide ingangen.

Eigenschappen
Een operationele versterker wordt gekenmerkt door een aantal eigenschappen, die schematisch voorgesteld worden in figuur 3/97.1-2.



Figuur 3/97.1-2: Het driehoekige symbool van een op-amp, met er in getekend de belangrijkste karakteristieke grootheden.

De versterkingsfactor
In de eerste plaats hebben we te maken met de versterkingsfactor A, een waarde die aanduidt hoe vaak de op-amp het spanningsverschil tussen beide ingangen versterkt. De waarde van die versterkingsfactor van de op-amp zélf (die men dan ook vaak de open-lus versterkingsfactor noemt, dus de versterking zonder beïnvloeding van schakelingen rond het IC) is zeer groot. Hoe groter, hoe beter en vandaar dat er op-amp's in de handel zijn die liefst een half miljoen maal versterken! Een "normale" op-amp, zoals de 741, is wat bescheidener: zijn open-lus versterking ligt rond de 200.000. Dat is een onvoorstelbaar hoge waarde: een spanningsverschil van 1 mV tussen de ingangen zou theoretisch tot een uitgangsspanning van 200 V leiden, als de op-amp dergelijke spanningen zou kunnen opwekken! In de praktijk zal men dan ook meestal maatregelen moeten treffen om de versterking van de schakeling aan banden te leggen.

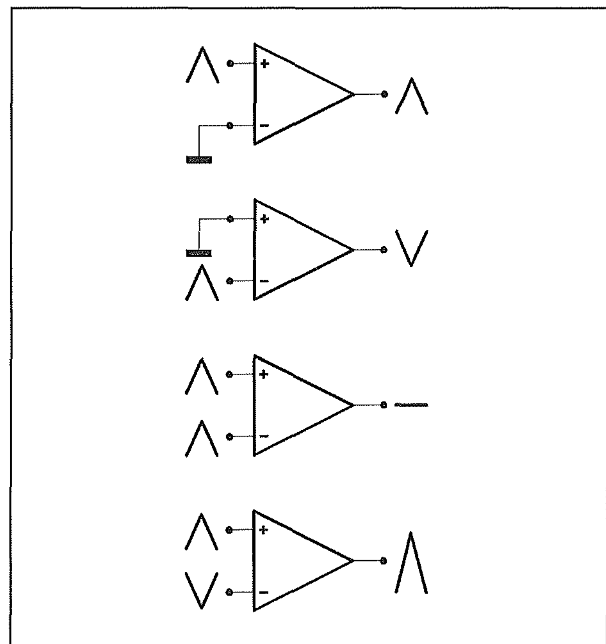
De ingangsimpedantie
De tweede grootheid is de ingangsimpedantie, in figuur 3/97.1-2 voorgesteld door Zi. Dat is de weerstand, die men tussen de beide ingangen aanwezig acht. Het heeft geen zin een ohmmeter aan te sluiten, de genoemde grootheid is wél aanwezig, maar niet met een dergelijke methode te meten. Zij is dan ook niet onder de vorm van een weerstandje in het IC aanwezig, maar is het resultaat van de werking van de ingangstrap van de schakeling. De ingangsimpedantie bepaalt wel de "last", die voorgaande schakelingen van het IC ondervinden. Is Zi laag, dan zal het IC een grote stroom trekken uit de voorgaande schakeling, wat natuurlijk niet zo ideaal is. Vandaar dat ook deze grootheid van op-amp's zo groot mogelijk moet zijn. Tegenwoordig maakt men operationele versterkers, met een Zi van 15.000 MΩ! Dat zijn de zogenaamde BiMOS versterkers, opgebouwd met FET's aan de ingang. De 741 is ook hier vrij bescheiden: de ingangsimpedantie is "slechts" 2 MΩ.

97.1 Inleiding

De uitgangsweerstand
Een laatste belangrijke eigenschap is de uitgangsweerstand Ro. Ook dit is een schijnbare weerstand, niet als dusdanig aanwezig, maar zich uitend als de uitgang van het IC wordt belast. Deze belasting (bijvoorbeeld een volgende trap) vraagt stroom van de op-amp en het gevolg is dat over de Ro een spanning valt. De uitgangsspanning van de op-amp daalt. Hoe lager de uitgangsweerstand, hoe kleiner de spanningsdaling en hoe minder problemen er kunnen ontstaan. Vandaar de eis, dat Ro zo laag mogelijk moet zijn. Voor de 741 geldt een waarde van 75 Ω.

Samenvatting
Samengevat kunnen we stellen dat een operationele versterker wordt bepaald door:
- zijn versterkingsfactor A, die zo groot mogelijk moet zijn;
- zijn ingangsimpedantie Zi, die ook zo hoog mogelijk moet zijn;
- zijn uitgangsweerstand Ro, die zo laag mogelijk moet zijn.

De sturing van een op-amp
Meestal wordt een op-amp symmetrisch gevoed. Dat wil zeggen dat we op de positieve voedingsaansluiting een positieve spanning ten opzicht van de massa aansluiten en op de negatieve voedingspen een negatieve spanning ten opzicht van massa, die in absolute waarde even groot zijn. Typisch waarden zijn ±12 V of ±15 V. Onder invloed van de spanningen op de ingangen, kan de uitgang van de op-amp variëren tussen de beide voedingsspanningen, men spreekt dan van een symmetrische uitsturing van het IC.
Uit het feit dat een op-amp twee ingangen heeft, volgt dat men de schakeling op vier verschillende manieren kan aansturen. Deze zijn getekend in figuur 3/97.1-3.
- Als de negatieve ingang met de massa wordt verbonden en het te versterken signaal aan de positieve ingang wordt aangeboden, dan zal de uitgang in fase met de ingangsspanning variëren. Als de ingangsspanning stijgt, dan zal ook de uitgangsspanning stijgen.



Figuur 3/97.1-3: De vier verschillende sturingsmogelijkheden van een operationele versterker.

- Legt u de positieve ingang aan de massa en voert u het ingangssignaal toe aan de negatieve ingang, dan zal de uitgangsspanning in tegenfase zijn met de ingang. Stijgt de ingangsspanning, dan zal de uitgangsspanning dalen.
- Een derde sturing gaat uit van de gelijke spanningen op beide ingangen. Omdat de op-amp een verschilversterker is en er in dat geval geen span-

97.1 Inleiding

ningsverschil tussen beide ingangen bestaat, zal de uitgang geen signaal leveren.

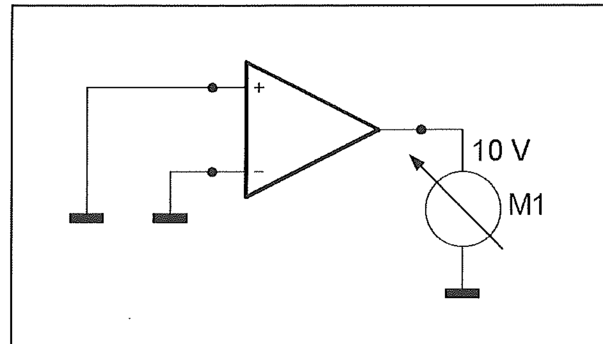
- De vierde sturing gaat uit van tegengestelde signalen op beide ingangen. Als de spanning op de positieve ingang stijgt, dan zal tegelijkertijd de spanning op de negatieve ingang dalen. Het spanningsverschil tussen de ingangen is dan steeds maximaal en zo zal het ook gesteld zijn met de uitgangsspanning.

Uiteraard zijn de getekende schakelingen zeer sterke vereenvoudigingen. Zou men de op-amp zo gebruiken, dan zou door de grote versterkingsfactor van het IC de uitgang bij het geringste spanningsverschil tussen de ingangen vastlopen tegen een van de voedingsspanningen. Praktische versterkerschakelingen met operationele versterkers zijn alleen mogelijk door het inlassen van **tegenkoppelingen**. Door weerstanden tussen de uitgang en de negatieve ingang kan men de A van de op-amp terugbrengen tot bruikbare waarden.

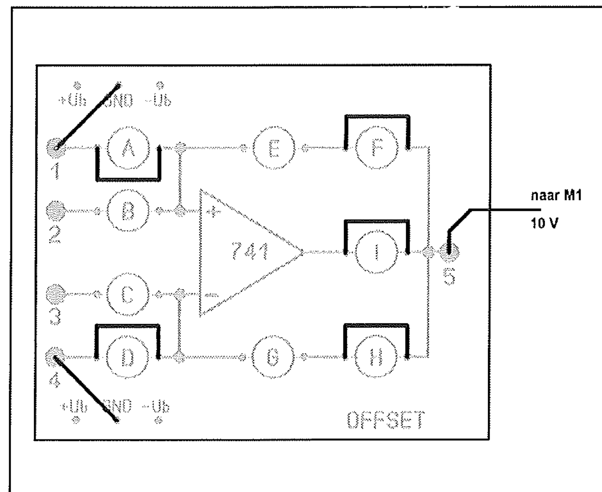
Het eerste experiment

In de vorige paragraaf stelden we dat een op-amp niet versterkt, als beide ingangen dezelfde spanning voeren. Dat kunnen we even uitproberen op de universele analoge trainer, door bijvoorbeeld beide ingang met de massa te verbinden. Het schema van dit schakelingetje is getekend in figuur 3/97.1-4, de bedrading op het experimenteerprintje volgt uit figuur 3/97.1-5.

Tussen de soldeerlipjes A, F, D. H en I worden draadjes gesoldeerd, de ingangen 1 en 4 gaan naar de massa-aansluitingen. Een van de drie meters wordt aangesloten op uitgang 5, de meterschakelaar staat op "10 V".



Figuur 3/97.1-4: Het eerste experiment, waarmee u kunt onderzoeken of de schakeling inderdaad 0 V aan de uitgang levert als er geen verschilspanning tussen de ingangen staat.



Figuur 3/97.1-5: De bedrading op de experimenteerprint voor het eerste experiment.

Als we nu de trainer inschakelen, stellen we vast dat de naald van de meter in de hoek vliegt. De uitgangsspanning van de schakeling is niet nul, zoals het zou horen, maar ongeveer +10 V of -8 V.

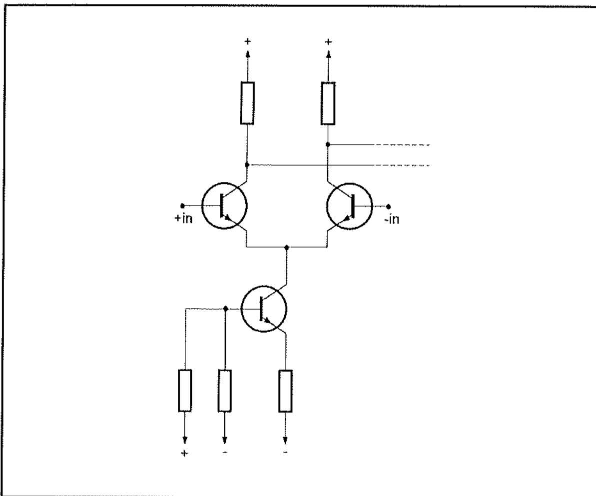
Hoe kan dat?

De offset

Een slechte eigenschap van operationele versterkers speelt ons parten: de offset. Kijk even naar figuur 3/97.1-6, een een-

97.1 Inleiding

voudige voorstelling van de ingangstrap van een op-amp. Twee transistoren T1 en T2 zijn geschakeld als verschilversterker, dus met gemeenschappelijke emitteraansluiting. De basis van de ene vormt de positieve ingang van de op-amp, de basis van de andere de negatieve ingang. Beide transistoren geleiden, dus tussen de basis en de emitter staat de normale geleidingsspanning U_{be} van ongeveer 0,7 V.



Figuur 3/97.1-6: Uit dit schema van de ingangstrap van een op-amp volgt de verklaring van het offset-verschijnsel.

In theorie zou U_{be1} gelijk moeten zijn aan U_{be2}. In de praktijk is dat nooit het geval, want die parameter is afhankelijk van een heleboel factoren, zoals constructie van het IC, temperatuur van de omgeving, etc. Dat verschil in U_{be}'s wordt de offset van de op-amp genoemd.
De twee U_{be}'s worden door het IC geïnterpreteerd als een deel van het ingangssignaal. Als we beide ingangen aan de massa leggen, dan denkt het IC dat de positieve ingang op een spanning staat van U_{be1} en de negatieve op een spanning van U_{be2}. Het geringste verschil tussen beide grootheden wordt 200.000 maal versterkt en leidt tot het volledig positief of negatief uitsturen van de schakeling. Vandaar de +10 V of -8 V aan de uitgang van het IC.

Offset compensatie
De offset is zeer ongewenst en vandaar dat alle op-amp's twee aansluitingen hebben, waarop een instelpotentiometertje wordt aangesloten en waarmee u de offset kunt compenseren. Op de rand van de experimenteerprint hebben we zo'n offsetcompensatie opgenomen. Draai voorzichtig aan dit potentiometertje. Op een bepaald moment vliegt de naald van de meter van de ene hoek van de schaal naar de andere. Dat punt is de goede instelling van de offsetcompensatie. Het is het overgangspunt van een positieve offset naar een negatieve. Dat we de uitgang van het IC niet op nul kunnen regelen is logisch. Zelfs een rest-offset van een fractie van een mV wordt 200.000 maal versterkt en stuurt de uitgang van de schakeling naar een van de voedingsspanningen.

Besluit
Een operationele versterker is een zeer goede versterker. Deze eigenschap heeft wel als nadeel dat u met de "naakte" schakeling niet zo veel kunt doen. In vrijwel alle gevallen zult u door het opnemen van weerstandsnetwerken tussen de in- en uitgangen de op-amp moeten dwingen dat te doen wat u ervan verwacht.

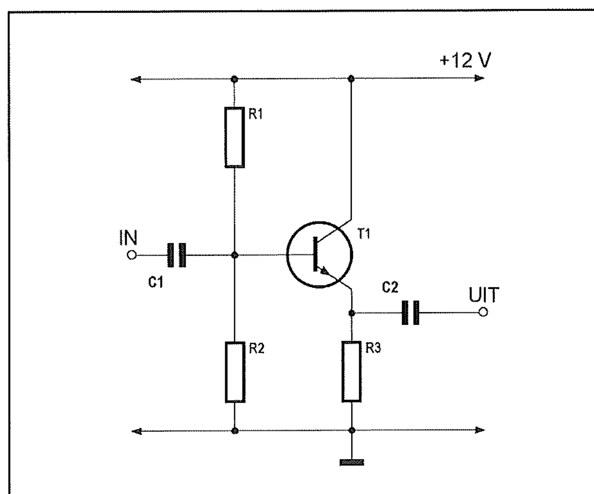
97.1 Inleiding

3/97.2

De op-amp als buffer versterker

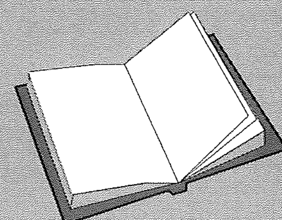
Inleiding
Buffer versterkers zijn schakelingen, die het aan de ingang aangeboden signaal zo min mogelijk beïnvloeden, maar wel als een soort van impedantie transformator werken. De ingangsimpedantie van een buffer is zeer groot, de uitgangsweerstand zeer laag. De spanningsversterking is gelijk aan één. Buffer versterkers worden daar gebruikt, waar rechtstreekse koppeling van de ene schakeling aan de andere schakeling problemen zou kunnen geven. Het eenvoudigste voorbeeld van een buffer is de emittervolger, zie figuur 3/97.2-1, vaak toegepast om kleine bromgevoelige signalen, zoals de uitgangsspanning van een microfoon, over een lange kabel te transporteren.

De op-amp als buffer
De schakeling van figuur 3/97.2-1 kost tóch nog zes kostbare onderdelen. Met een op-amp kunt u veel eenvoudiger een buffer versterker maken, wat vrij logisch is als u zich even de vrij hoge in- en vrij lage uitgangsimpedantie van het IC voor ogen haalt. De fundamentele schakeling van een op-amp buffer is de eenvoud zelve: het te bufferen signaal wordt aan de positieve ingang aangeboden, de negatieve ingang is rechtstreeks gekoppeld met de uitgang. Eén onderdeel, om precies te zijn! In figuur 3/97.2-2 is een testschema getekend, waarmee u de eigenschappen van zo'n buffer kunt opsporen.



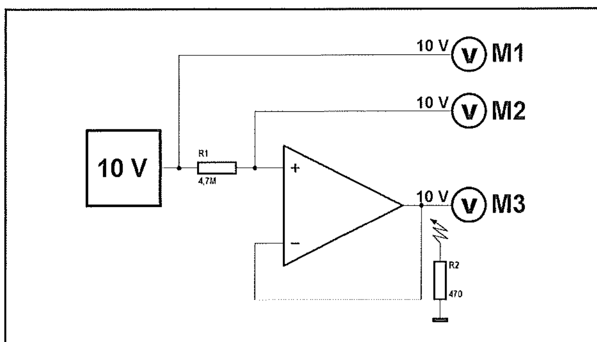
Figuur 3/97.2-1: Het eenvoudigste voorbeeld van een buffer versterker is de emittervolger.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12
Hoofdstuk 4/7.43



97.2 De op-amp als buffer versterker

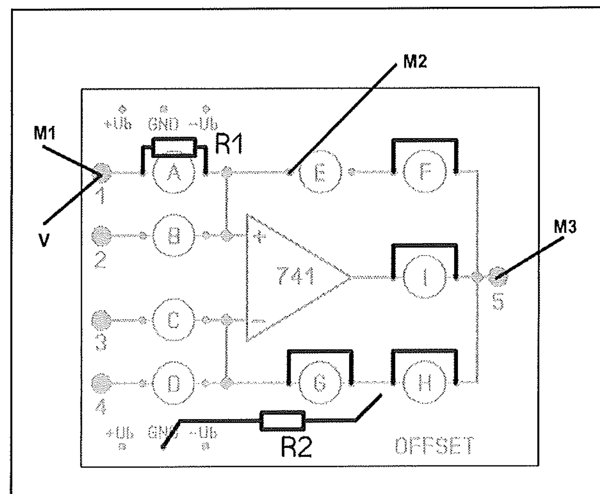
Aan de ingang sluit u een van de gelijkspanningsuitgangen van uw universele analoge trainer aan, geschakeld op het ±10 V bereik. De drie meetschakelingen staan eveneens op het ±10 V bereik.
De weerstand R1 van 4,7 MΩ wordt vast aangebracht, de weerstand R2 van 470 Ω wordt zo in de schakeling opgenomen, dat u hem even met de uitgang van het IC in contact kunt brengen als het experiment daarom vraagt. De twee weerstanden zijn niet nodig voor de buffer zélf, maar zijn hulpelementen om de drie belangrijke eigenschappen van de schakeling te kunnen meten: de versterkingsfactor, de ingangsimpedantie en de uitgangsweerstand.



Figuur 3/97.2-2: De schakeling waarmee u de eigenschappen van een op-amp buffer versterker kunt onderzoeken.

Het tweede experiment
Figuur 3/97.2-3 geeft de bedradingsopzet op uw experimenteerprintje. De drie verbindingen naar de drie meters en de ene verbinding naar de gelijkspanningsbron maakt u natuurlijk met de kabeltjes die u speciaal voor dit doel heeft gemaakt.
Bij het aanschakelen van de voedingsspanning zult u zien dat alle meters dezelfde spanning aanduiden. Wat kunt u hieruit afleiden?

- De spanningsversterking
  In de eerste plaats dat de spanningsversterking van de schakeling gelijk is aan één. 2 V aan de ingang geeft 2 V aan de uitgang.
- De ingangsimpedantie
  In de tweede plaats dat de ingangsimpedantie van de schakeling blijkbaar zeer hoog is. De ingang vraagt zo weinig stroom van de ingangsspanning, dat er over de toch zeer grote weerstand R1 geen meetbare spanningsval optreedt. Zou dat wel het geval zijn, dan zou M2 een lagere spanning aangeven dan M1. Uit dat spanningsverschil zouden we de stroom door R1 kunnen berekenen en bijgevolg ook de ingangsimpedantie van de buffer.



Figuur 3/97.2-3: De bedrading voor de buffer versterker op uw experimenteerprintje.

- De uitgangsweerstand
  Stel de ingangsspanning van de schakeling in op +5 V, verbindt het vrije einde van de weerstand R2 even met de uitgang en let op de meter M3. De naald verroert niet. Hieruit kunnen we besluiten dat de uitgangsweerstand van de buffer erg laag is. Immers, de

97.2 De op-amp als buffer versterker

belasting met een weerstand van 470 Ω doet een stroom van ongeveer 10 mA vloeien. Deze stroom komt uit de uitgang van de op-amp en loopt ook door de inwendige weerstand van de uitgang van de op-amp. Als deze weerstand bijvoorbeeld 10 Ω zou zijn, dan zou er door het aansluiten van de belastingsweerstand een spanningsval van 0,1 V aan de uitgang ontstaan, iets dat u zonder meer op M3 ziet. Nu verroert de naald van de meter niet eens, waaruit volgt dat de inwendige weerstand van de buffer erg laag is.

Besluit

Een buffer heeft een spanningsversterking van 1, een zeer hoge ingangsimpedantie en een zeer lage uitgangsimpedantie. Theoretisch komt het er op neer dat de waarde van de ingangsimpedantie van de "naakte" op-amp vermenigvuldigd wordt met de versterkingsfactor van de op-amp en de waarde van de uitgangsweerstand van de "naakte" op-amp gedeeld wordt door dezelfde factor.

Verklaring van de werking

Hoe is die ontzettend hoge versterkingsfactor van 200.000 door één simpele doorverbinding tussen de in- en de uitgang teruggebracht tot één? Dat is fysisch het makkelijkst aan te tonen door even te veronderstellen dat de op-amp erg traag werkt, of met ander woorden dat een spanning op de ingang niet dadelijk een spanning op de uitgang tot gevolg heeft. Als we dan opeens een spanning van bijvoorbeeld 1 V op de positieve ingang aansluiten, dan zal de uitgang eerst nog even nul blijven. Dat is dan ook de spanning op de negatieve ingang. Er ontstaat dus een spanningsverschil tussen de beide ingangen van niet minder dan 1 V, de op-amp gaat zijn volle 200.000 eenheden versterkingsfactor op dat spanningsverschil loslaten. De uitgangsspanning stijgt erg snel. Deze spanningsstijging vinden we echter dadelijk terug op de negatieve ingang. Het gevolg is dat het spanningsverschil tussen de beide ingangen steeds kleiner wordt. Op een bepaald moment is de uitgangsspanning gestegen tot bijna +1 V. Dan ontstaat er een spanningsverschil tussen de positieve en negatieve ingang van een fractie van een volt. Dat onmeetbaar klein spanninkje levert, na versterking met 200.000, een uitgangsspanning op, die op een haar na gelijk is aan de spanning op de ingang.

Niet écht gelijk aan een

Uit de bespreking van de werking van de buffer valt af te leiden, dat de versterking niet echt exact 1 is, maar een haartje minder. Dat zeer kleine verschilspanninkje zorgt immers voor de stabiele toestand van de schakeling.
Waarom zegt men dan toch steeds dat een buffer een versterking van 1 heeft? Omdat de afwijking werkelijk verwaarloosbaar is. Officieel is de spanningsversterking van een buffer gelijk aan:

$A' = A / (1 + A)$

waarin A' de versterking van de buffer is en A de versterking van de op-amp zélf. Vul deze formule maar eens in voor een 741 met zijn A van 200.000:

$A' = 200.000 / (1 + 200.000)$

$A' = 200.000 / 200.001 = 0{,}99999999....$

Een muggenzifter, die daar geen 1 van wil maken!

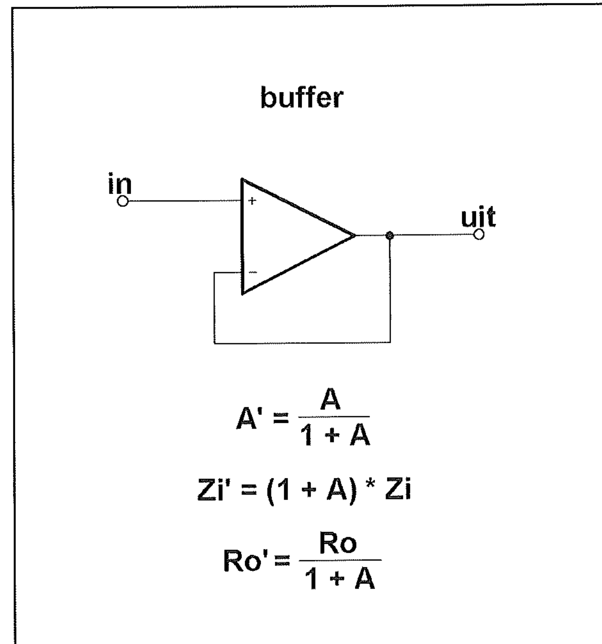
Geen spanningsverschil tussen de ingangen

Uit deze bespreking volgt een zeer belangrijke eigenschap van op-amp's. **Een**

97.2 De op-amp als buffer versterker

schakeling waarin een op-amp zit zal steeds streven naar een minimaal spanningsverschil tussen de twee ingangen van de op-amp. Omdat dit spanningsverschil niet eens echt meetbaar is, zegt men dat een op-amp er steeds voor zorgt dat zijn twee ingangen op dezelfde spanning komen te staan. Alle schakelingen rond op-amp's kunnen met deze eenvoudige regel worden verklaard, let maar op bij de volgende experimenten.

Samenvatting
In de tabel van figuur 3/97.2-4, tenslotte, zijn alle eigenschappen van een buffer versterker met een op-amp overzichtelijk gegroepeerd. De symbolen met accent duiden op eigenschappen van de totale schakeling, de symbolen zonder accent op eigenschappen van de op-amp zélf.



Figuur 3/97.2-4: Samenvatting van de specificaties van een buffer versterker.

3/97.3

De op-amp als omkeerversterker

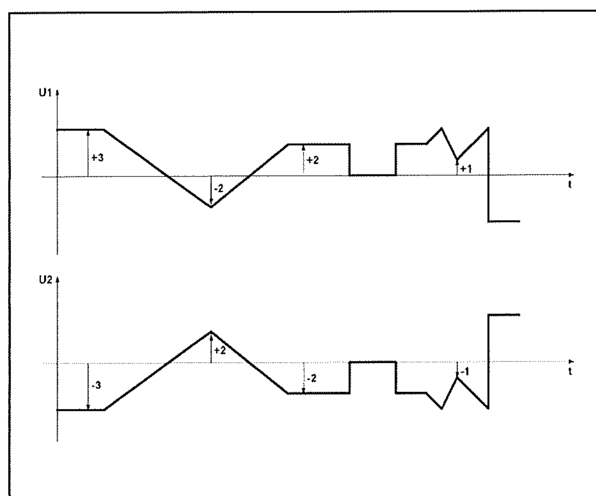
Inleiding

Vaak komt het voor dat u de absolute grootte van een signaal wilt behouden, maar dat u het signaal moet omkeren. Denk bijvoorbeeld aan een brugversterker, waar u het audiosignaal moet omkeren alvorens het de tweede eindversterker van de brug voedt. De operationele versterker is een ideale omkeerversterker.

Eerste vraag is echter wat bedoeld wordt met "het omgekeerde van een signaal". Figuur 3/97.3-1 toont een signaal U1 en het omgekeerde signaal U2. De laatste spanning is, absoluut gezien, steeds gelijk aan het origineel. Is U1 +3V, dan is U2 -3 V en zo verder. Niet de grootte van het signaal verandert, maar wel de polariteit. Het omgekeerde of inverse van een signaal ontstaat, als u dit signaal spiegelt rond de horizontale nul-as.

De omkeerversterker met een op-amp

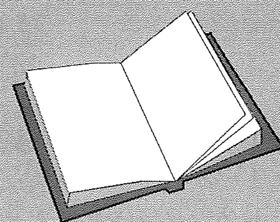
Met transistoren is de omkeerbewerking een hele klus, een op-amp vraagt slechts drie weerstandjes. Het basisschema van de analoge inverter is getekend in figuur 3/97.3-2. Het signaal wordt via een weerstand R1 aangesloten aan de negatieve ingang, tussen deze ingang en de uitgang staat een even grote weerstand R2. De positieve ingang van de op-amp ligt aan de massa geschakeld via een weerstand R3, gelijk aan de helft van de eerder genoemde componenten.



Figuur 3/97.3-1: Uit deze grafiek volgt duidelijk de definitie van het begrip "omkeren van een spanning".

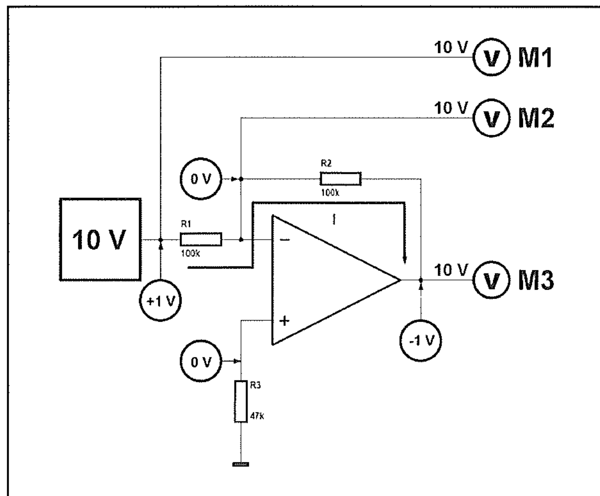
LEES OOK:

Hoofdstuk 3/12
Hoofdstuk 4/7.43

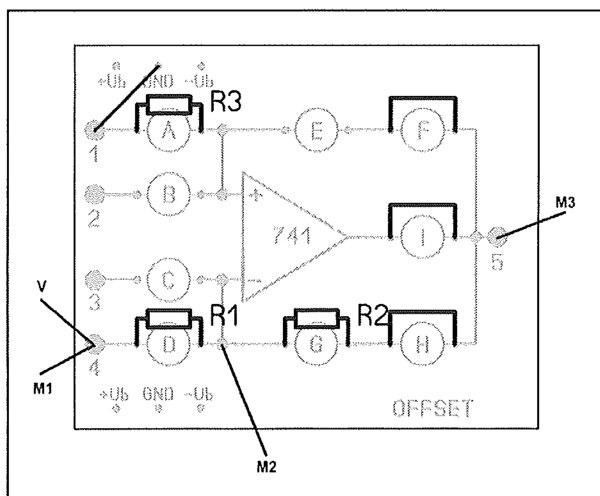


97.3 De op-amp als omkeerversterker

Experiment 3
De schakeling kan snel op uw experimenteerprint worden opgebouwd en verbonden met de analoge trainer, zie figuur 3/97.3-3, waarbij de drie meters en de gelijkspanningsgenerator op het bereik "10 V" worden geschakeld.



Figuur 3/97.3-2: Het basisschema van de omkeerversterker met een op-amp.



Figuur 3/97.3-3: De omkeer versterker op uw experimenteerprint.

De positieve ingang van de op-amp ligt op massapotentiaal. Het wekt dan ook geen verbazing als u op meter M2, verbonden met de negatieve ingang, steeds 0 V afleest. Zoals geschreven bij het vorige experiment, streeft een op-amp immers steeds naar minimaal spanningsverschil tussen zijn beide ingangen. Als de positieve ingang op 0 V staat, dan zal de schakeling er naar streven ook de negatieve ingang op 0 V te zetten.
De inverterende werking wordt bewezen door aan de ingang een spanning van bijvoorbeeld +5 V aan te leggen (M1) en de spanning op de uitgang af te lezen (M3). Deze bedraagt -5 V.

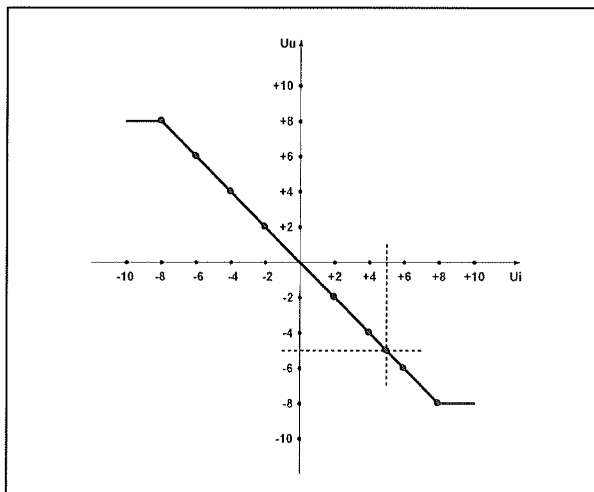
Verklaring van de schakeling
De ingangsimpedantie van de op-amp is zeer groot, vergeleken met de waarde van de weerstanden R1 en R2. De weerstanden R1 en R2 staan in serie tussen de ingang en de uitgang van de schakeling. Door deze serieschakeling loopt een stroom I, waarvan de grootte wordt bepaald door de waarde van de ingangsspanning en de grootte van de twee weerstanden. De stroom die via de negatieve ingang in de op-amp vloeit, is verwaarloosbaar klein, vanwege de eerder genoemde hoge Zi. Omdat R1 en R2 even groot zijn, zullen de spanningsvallen over beide weerstanden even groot zijn. Dat kan niet anders, want de wet van ohm zegt dat de spanning over een weerstand gelijk is aan de vermenigvuldiging van stroom en weerstand. Beide grootheden zijn voor beide weerstanden aan elkaar gelijk. Over R1 valt de ingangsspanning. De negatieve ingang staat immers op massapotentiaal. Als over R1 een spanning valt, gelijk aan de ingangsspanning, dan moet u per definitie over R2 dezelfde spanningsval meten.
Een voorbeeldje. Stel de ingangsspanning gelijk aan +1 V. Deze spanning valt over R1, met de in figuur 3/97.3-2 gete-

97.3 De op-amp als omkeerversterker

kende polariteit: linker aansluiting positief ten opzichte van rechter aansluiting. Omdat R2 door dezelfde stroom in dezelfde richting wordt doorlopen, moet de spanning over deze weerstand dezelfde polariteit hebben. Dus: linker aansluiting positief ten opzichte van rechter aansluiting. Nu ligt de linker aansluiting van de weerstand aan de massa. Aan het gestelde wordt alleen voldaan, als de rechter aansluiting op -1 V staat. Hetgeen precies het omgekeerde of inverse van de ingangsspanning is.

De transferkarakteristiek

Dit experiment is ideaal om vertrouwd te worden met het begrip "transferkarakteristiek". Dit is een grafiekje dat het verband aangeeft tussen de in- en uitgangsspanning van een schakeling. Figuur 3/97.3-4 geeft u de transferkarakteristiek van de omkeerversterker.



Figuur 3/97.3-4: De transferkarakteristiek geeft het verband tussen de ingangsspanning en de uitgangsspanning.

Op de horizontale as worden de aan de ingang aangelegde spanningen weergegeven, de verticale as geeft de spanningen op de uitgang. Als u bijvoorbeeld op de ingang een spanning van +5 V aanlegt, dan meet u op de uitgang -5 V. Beide waarden worden op de respectievelijke assen aangegeven en twee hulplijntjes (gestippeld weergegeven) worden getrokken. Het snijpunt van deze hulplijntjes bepaalt één punt van de karakteristiek. Als u deze procedure voor verschillende ingangsspanningen herhaalt, ontstaat een rij van puntjes, die u kunt doorverbinden. Het resultaat is een kromme (in dit geval een rechte lijn): de transferkarakteristiek.

Het uitsturingsbereik van een schakeling

Als u dat doet voor de inverter, zult u vaststellen dat er twee knikken in de karakteristiek ontstaan. Als u de ingangsspanning namelijk groter maken dan ongeveer +8 V, dan zal de uitgangsspanning op -8 V blijven hangen. Eenzelfde verschijnsel doet zich voor bij een te grote negatieve ingang. Op deze manier kunt u het uitsturingsbereik van de schakeling meten. Zolang de karakteristiek recht is, is er niets aan de hand. De uitgang is het inverse van de ingang. Voor te grote positieve of negatieve ingangsspanningen gaat de inverterende werking verloren. Men zegt dat de uitgangsspanning van de op-amp vastloopt tegen de voedingsspanning. Het is logisch dat de op-amp geen grotere spanningen kan opwekken dan de waarde van zijn voedingsspanningen.

Opmerking

Bij de 741-print worden de voedingsspanningen door middel van zenerdioden begrensd op ±10 V. Hieruit blijkt duidelijk dat het uitsturingsbereik van een op-amp lager is dan de totale voe-

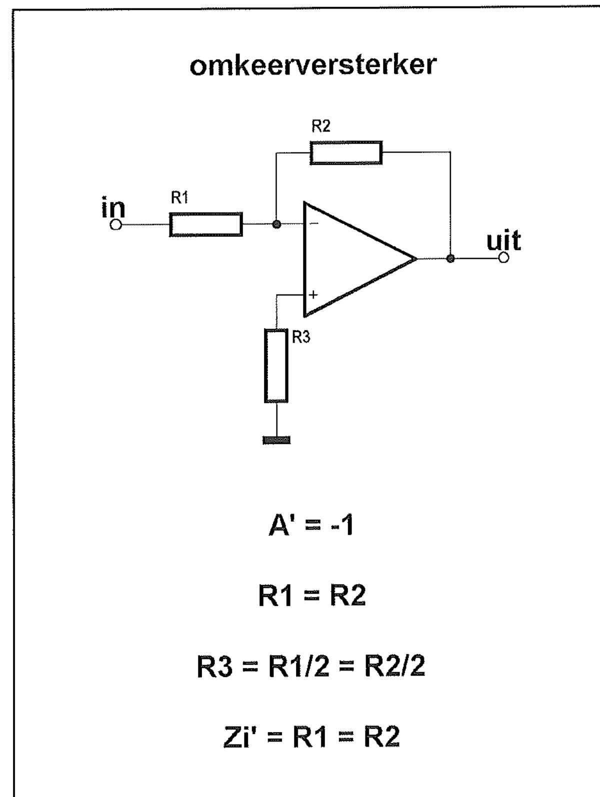
97.3 De op-amp als omkeerversterker

dingsspanning. Er gaan een aantal volt verloren in het interne van het IC.

Samenvatting

De tabel van figuur 3/97.3-5 geeft een overzicht van de eigenschappen van de inverter. De versterking van de schakeling A' is gelijk aan -1. Het minteken duidt op de inverterende werking. Belangrijk is de eis dat R1 gelijk is aan R2. Iedere afwijking zorgt voor een niet precies gelijk zijn van in- en uitgangsspanning (in absolute waarde, uiteraard).

De waarde van R3 is niet kritisch, meestal kiest men deze weerstand gelijk aan de helft van R1. Uit het feit dat de negatieve ingang aan de massa ligt, volgt dat de ingangsimpedantie Zi' van de schakeling volledig wordt bepaald door de waarde van R1. Deze weerstand staat immers geschakeld tussen de ingang en de op massapotentiaal liggende negatieve ingang. De Zi van de op-amp speelt dus nu niet mee!



Figuur 3/97.3-5: Samenvatting van de specificaties van de omkeerversterker met op-amp.

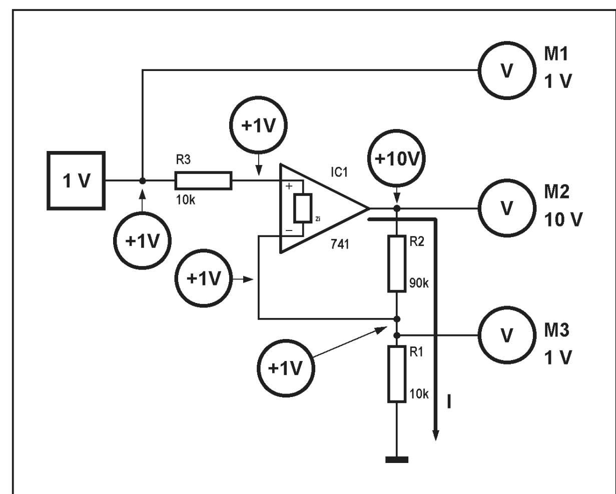
3/97.4

De op-amp als niet-inverterende versterker

Inleiding
Tot nu toe hebben we de op-amp gebruikt in schakelingen, waar er van echte versterking geen sprake was. De volgende experimenten behandelen een paar versterkerschakelingen, ieder geschikt voor specifieke toepassingen. Als we prijs stellen op een hoge ingangsimpedantie, is de in dit experiment behandelde niet-inverterende versterker ideaal.

Niet-inverterende werking
Zoals de naam reeds zegt, werkt de versterker niet-inverterend. Dat wil zeggen dat de uitgangsspanning in fase is met de ingangsspanning. Een spanningsstijging aan de ingang heeft een spanningsstijging aan de uitgang tot gevolg.

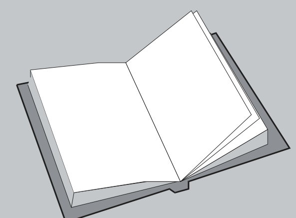
Het basisschema
Het basisschema van de schakeling is getekend in figuur 3/97.4-1. De ingangsspanning wordt via een weerstand R3 aangesloten op de positieve ingang van de versterker. Tussen de uitgang en de massa staat een seriekring van twee weerstanden R1 en R2. De negatieve ingang is aangesloten op het knooppunt van beide weerstanden. Als voorbeeld construeren we een maal tien versterker. De uitgangsspanning is tien keer groter dan de ingangsspanning. Zoals later zal blijken, wordt de versterkingsfactor van tien bepaald door de onderlinge verhouding van R1 en R2.



Figuur 3/97.4-1: Het basisschema van de niet-inverterende versterker.

Het is daarom zeer belangrijk dat R2 exact negen maal groter is dan R1. Als we

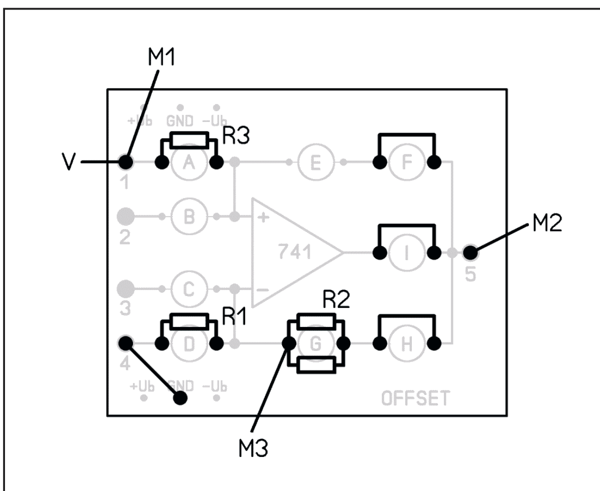
LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12
Hoofdstuk 4/7.43



97.4 De op-amp als niet-inverterende versterker

R1 gelijk aan 10 kΩ kiezen, moet R2 gelijk zijn aan 90 kΩ. Dat is geen standaardwaarde, maar twee parallel geschakelde weerstanden van 180 kΩ leveren de gewenste waarde op. Vandaar dat in het bedradingsschema van figuur 3/97.4-2 op plaats G twee van die weerstanden zitten.

Aan de slag!
Bouw de schakeling volgens figuur 3/97.4-2 op één van uw experimenteerprinten. Aan de ingang wordt een van de instelbare gelijkspanningen V aangesloten, de punten M1, M2 en M3 gaan naar de drie meetapparaatjes op uw trainer.
Als u de analoge trainer inschakelt, zult u vaststellen dat de uitgangsspanning steeds een factor tien groter is dan de ingangsspanning. Het is dus duidelijk, dat u de ingangsspanning moet beperken tot het gebied van ±1 V. Voert u grotere spanningen toe, dan zal de uitgang van de op-amp vastlopen tegen een van de voedingsspanningen.



Figuur 3/97.4-2: Het schema uitgewerkt op uw experimenteerprint.

Hoe werkt deze schakeling?
Steeds hetzelfde liedje: de op-amp stelt zijn uitgangsspanning zó in, dat er geen spanningsverschil bestaat tussen de beide ingangen. Stel, dat we aan de ingang een spanning van +1 V aanbieden. Deze spanning belandt via weerstand R3 op de positieve ingang. Deze weerstand is erg klein, vergeleken met de grote inwendige weerstand van de op-amp. U kunt dus aannemen dat deze spanning onverzwakt op de positieve ingang van de op-amp terecht komt. De schakeling zal er nu voor zorgen, dat ook de negatieve ingang op een spanning van +1 V komt te staan. Deze spanning staat natuurlijk ook op het knooppunt van de spanningsdeler R1-R2. Door de twee weerstanden van de deler loopt één stroom I. De belasting van de negatieve ingang kunnen we verwaarlozen. Als R1 en R2 door dezelfde stroom worden doorlopen, verhouden de spanningsvallen over beide componenten zich zoals hun onderlinge weerstandsverhouding. R2 is negen maal R1, de spanningsval over R2 zal dus ook negen maal groter zijn dan de spanningsval over R1. Deze laatste waarde is 1 V, over R2 meet u dus 9 V. De spanningen over R1 en R2 staan in serie, met dezelfde polariteit. De uitgang van de schakeling staat dus op een spanning van 1 V + 9 V = 10 V. De schakeling heeft de ingangsspanning exact 10 maal versterkt.

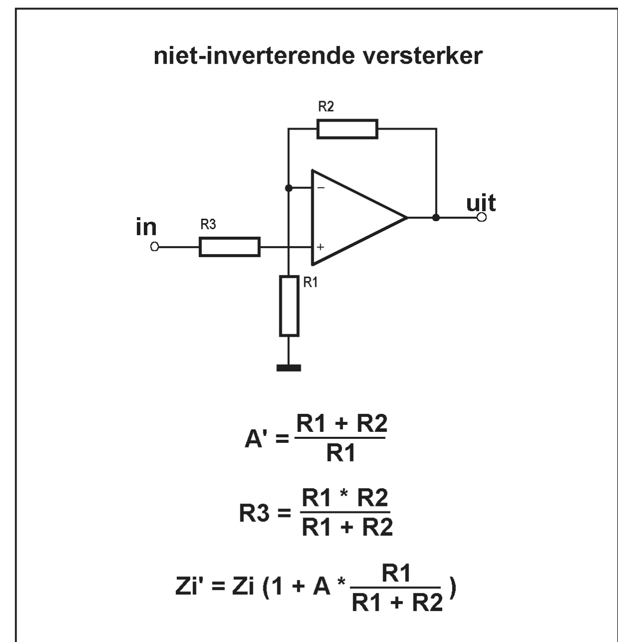
Instellen van de versterking
Het zal duidelijk zijn dat de spanningsversterking wordt bepaald door de verhouding tussen R1 en R2. Als u voor R1 een weerstand van 1 kΩ kiest en voor R2 een weerstand van 99 kΩ, dan zal de schakeling honderd maal versterken. Met deze schakeling zijn dus erg grote versterkingsfactoren mogelijk. De waarde van R3 is niet zo kritisch: meestal kiest men een waarde die ongeveer gelijk is

aan de parallel schakeling van R1 en R2. De ingangsimpedantie van de versterker is zeer hoog. Omdat de spanning op de negatieve ingang de waarde van de ingangsspanning volgt, staat er over de serieschakeling van R3 en de Zi van de op-amp geen spanning. Er vloeit dus ook geen stroom door dit onderdeel, de ingang wordt nauwelijks belast.

De invloed van de offset
Met deze schakeling kunnen we de invloed van de offset duidelijk maken. Sluit de ingang van de versterker aan op de massa. Verhoog de versterkingsfactor van de schakeling, door R1 te verlagen tot 1 kΩ. In principe moet u nu op de uitgang ook nul volt meten. Waarschijnlijk meet u een spanning van enige honderden millivolt positief of negatief. Dit wordt veroorzaakt door de reeds in het eerste experiment genoemde offset van de op-amp.
Verdraai de compensatiepotentiometer aan de rand van de experimenteerprint. U kunt daarmee de offset compenseren, zodat de uitgang nul volt wordt bij nul volt op de ingang.
Het zal duidelijk zijn dat de invloed van de offset toeneemt, als u de schakeling meer laat versterken. De offset introduceert immers een kleine verschilspanning tussen beide ingangen en deze verschilspanning wordt versterkt met de door R1 en R2 bepaalde versterkingsfactor.

Een offsetspanning van 1 mV levert bij een x 100 versterker reeds een fout op de uitgang van 0,1 V! Bij schakelingen met grote versterkingsfactoren is het dus absoluut noodzakelijk de offset te compenseren.

Samenvatting
Zoals gebruikelijk geeft de laatste figuur, in dit geval figuur 3/97.4-3, een overzicht van de eigenschappen van deze schakeling.



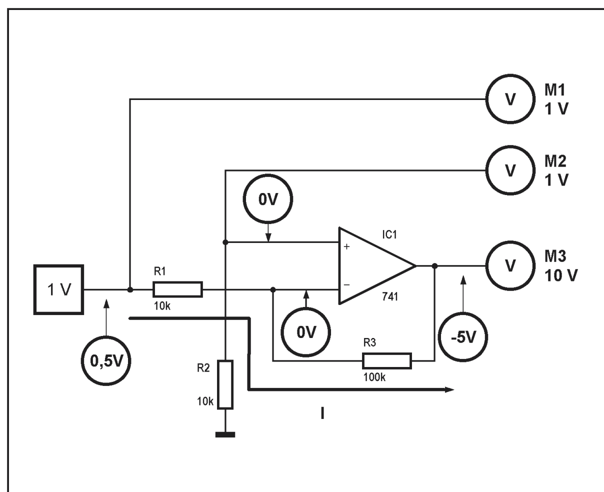
Figuur 3/97.4-3: Samenvatting van de specificaties van de niet-inverterende versterker.

97.4 De op-amp als niet-inverterende versterker

3/97.5

De op-amp als inverterende versterker

De inverterende versterker
De inverterende versterker is niet beroemd vanwege zijn hoge ingangsimpedantie, zoals zijn soortgenoot de niet-inverterende versterker, maar vormt wél de basis van allerlei soorten mengversterkers. Vandaar dat een nadere kennismaking met deze schakeling op haar plaats is. Het principeschema van de inverterende versterker is getekend in figuur 3/97.5-1.

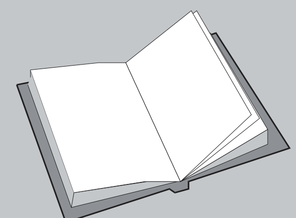


Figuur 3/97.5-1: Het principeschema van de inverterende versterker.

De ingangsspanning wordt aangeboden aan de negatieve ingang via een weerstand R1. Tussen deze ingang en de uitgang staat een terugkoppelweerstand R3. De positieve ingang van de operationele versterker wordt met de massa verbonden via weerstand R2.
De ingetekende weerstandswaarden leveren een x(-10)-versterker op. Het minteken duidt op de inverterende werking van de schakeling: als de ingangsspanning positief is, dan zal de uitgang negatief zijn. Het verschil tussen de absolute waarde van in- en uitgang wordt bepaald door de versterkingsfactor, in het voorbeeld dus 10. Een positieve spanning van 0,5 V aan de ingang resulteert in een negatieve spanning van 5 V aan de uitgang.

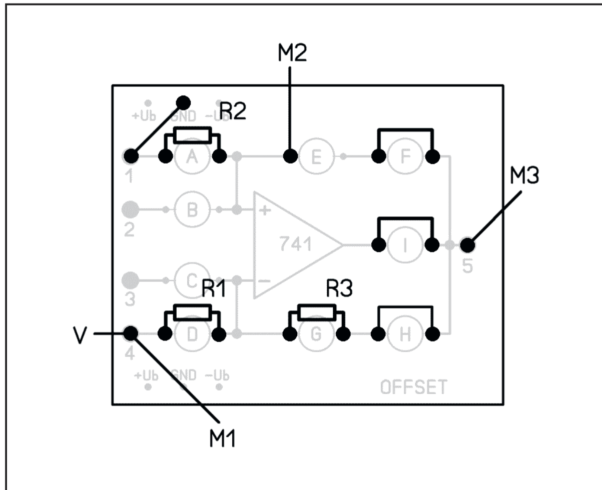
De schakeling op de trainer
Bouw de schakeling op volgens figuur 3/97.5-2, sluit de ingang 4 aan op een van de gelijkspanningsbronnen van de trainer (ingesteld op +0,5 V) en de getekende punten op de drie metertjes. Als

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12
Hoofdstuk 4/7.43



97.5 De op-amp als inverterende versterker

het apparaat wordt ingeschakeld, zal M3 inderdaad -5 V gaan aanwijzen.



Figuur 3/97.5-2: De inverterende versterker op een van uw experimenteerprintjes.

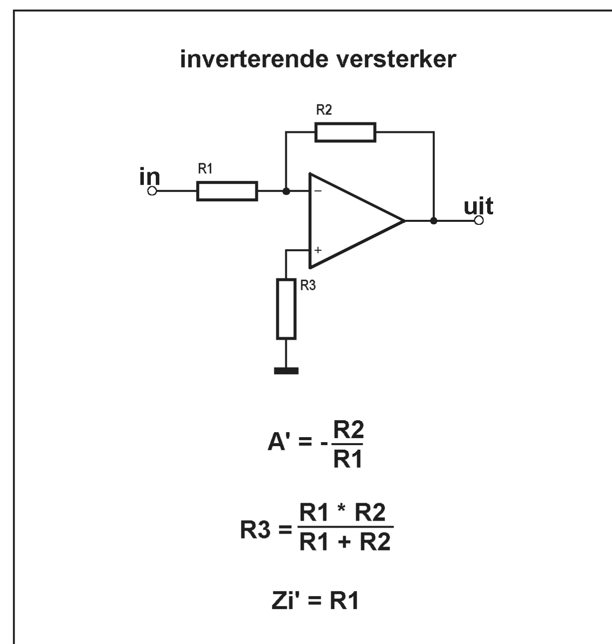
De werking van de schakeling

De werking van de schakeling is, zoals steeds, te verklaren uit het feit dat de op-amp het spanningsverschil tussen beide ingangen tot nul regelt. De positieve ingang staat op nul volt, deze ingang ligt immers via R2 aan de massa. De spanning op de negatieve ingang zal dus ook nul zijn. Over weerstand R1 staat bijgevolg een spanning van 0,5 V en wel zo dat de linker aansluiting positief is ten opzichte van de rechter. De stroom, die als gevolg van deze spanningsval door R1 lopen, kan geen andere kant op dan door R3. De ingangsimpedantie van de opamp is, zoals diverse malen gemeld, bijzonder hoog en vormt geen belasting voor de relatief laagohmige weerstandsdeler R1/R3.

Als twee weerstanden door een en dezelfde stroom worden doorlopen, dan verhouden de spanningsvallen over de onderdelen zich zoals hun waarden. R3 is tien maal groter dan R1, dus zal de spanningsval over de eerstgenoemde weerstand ook tien maal groter zijn dan over R1. Over R1 valt 0,5 V, bijgevolg kunt u over R3 een spanning van 5 V meten. Belangrijk is de polariteit van deze spanning. Omdat de stroom I beide weerstanden in dezelfde richting doorloopt, zal ook de polariteit van beide spanningsvallen identiek zijn. De linker aansluiting van R3 is dus positief ten opzichte van de rechter. Omdat de linker aansluiting van R3 op 0 V staat, moet de rechter dus wel op een spanning van -5 V staan.

Samenvatting

Zoals gebruikelijk zijn in figuur 3/97.5-3 de belangrijkste eigenschappen van de inverterende versterker samengevat.



Figuur 3/97.5-3: Samenvatting van de belangrijkste specificaties van de inverterende versterker.

De versterkingsfactor wordt bepaald door de verhouding tussen R2 en R1. Voor R3 wordt weer de vervangingsweer-

97.5 De op-amp als inverterende versterker

stand van de parallel schakeling van R1 en R2 gekozen. De ingangsimpedantie Zi' wordt volledig bepaald door de waarde van de weerstand R1.
Vanwege deze laatste eigenschap is de inverterende versterker een ideale schakeling om een trap te ontwerpen die een zeer goed bepaalde ingangsimpedantie moet hebben. Sommige spanningsgevers (microfoons!) eisen een bepaalde afsluitimpedantie, bijvoorbeeld 47 kΩ. Met een inverterende versterker kunt u niet alleen het signaal van de spanningsgever versterker, maar er meteen voor zorgen dat het onderdeel met een correcte weerstand wordt afgesloten. Het komt er op aan de waarde van R1 gelijk te maken aan de voorgeschreven afsluitimpedantie.

97.5 De op-amp als inverterende versterker

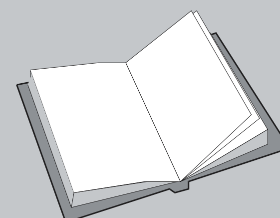
3/97.6

De op-amp als mengversterker

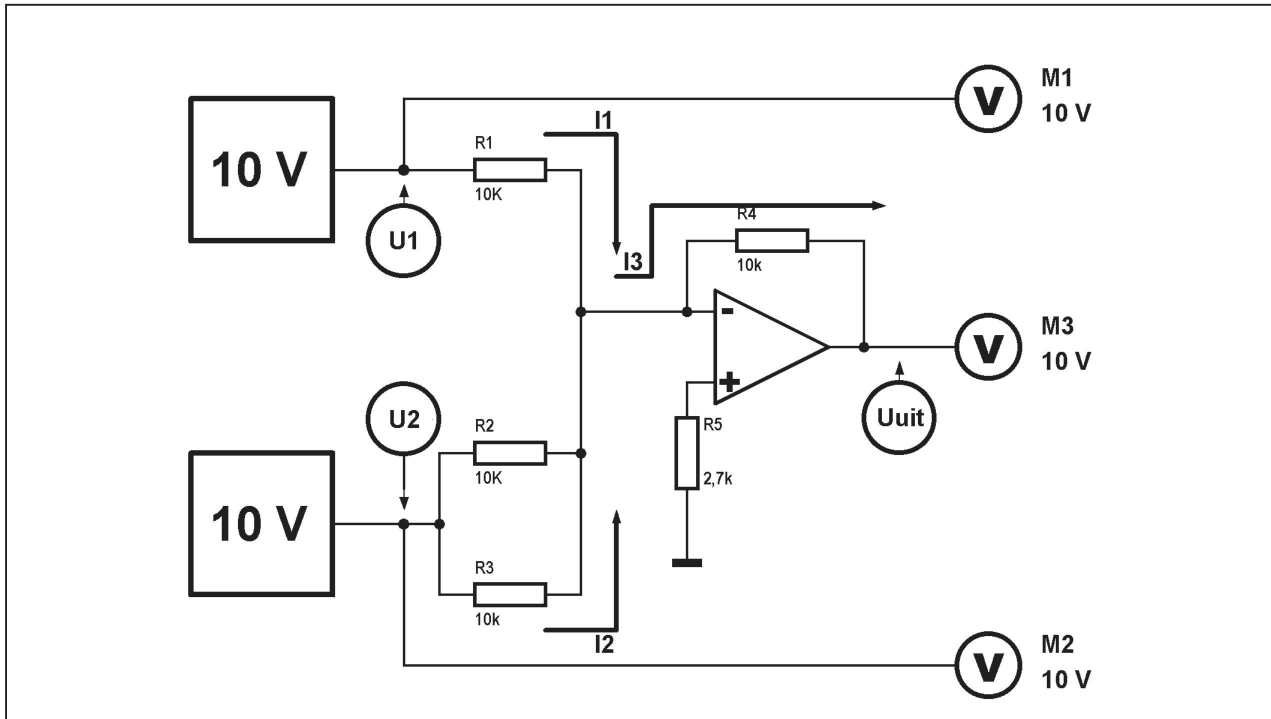
Een eenvoudige mengversterker
Mengschakelingen worden uiteraard vaak toegepast in de elektronica. Denk maar aan mixers voor geluidsstudio's, eenvoudige mengertjes voor de geluidshobbyist en allerlei geluidseffectschakelingen (echo, nagalm, vierkanaals, basisbreedteregeling, ruisonderdrukkers) waar steeds een mengschakeling een fundamenteel onderdeel van de elektronica vormt.
De in het vorig experiment beschreven inverterende versterker vormt dé basis van iedere (goede) mengversterker. Men noemt hem dan actieve menger, omdat er een actief element, in dit geval een operationele versterker, bij betrokken is. Dit in tegenstelling tot passieve mengers, die alleen met weerstanden werken. Op de voor- en nadelen van beide schakelingen komen we in de loop van dit verhaal terug.

Een tweekanaals menger
Eerst maar eens naar de experimenten, waarbij het schema van figuur 3/97.6-1 als basis dient. Dit schema vormt een tweekanaals menger, de spanningen U1 en U2 verschijnen gemengd op de uitgang. U herkent zeer duidelijk de basisopzet van de inverterende versterker. De twee ingangsspanningen sturen ieder via een eigen weerstand de inverterende ingang van de op-amp. Om het wat spannender te maken sluiten we U2 aan via een parallel schakeling van twee weerstanden. De weerstandswaarde tussen ingang 2 en de op-amp is nu gelijk aan de helft van de weerstandswaarde tussen ingang 1 en inverterende ingang. We stellen U1 en U2 in op 0 V en constateren dat ook de uitgang op 0 V staat. Voer via ingang U1 een spanning toe van +2 V. Op de uitgang leest u een spanning van -2 V af. Deze spanningsverdeling voldoet aan de werking van de inverterende versterker. De weerstanden R1 en R4 zijn aan elkaar gelijk en als we ingang 2 even buiten beschouwing laten, dan voldoet de schakeling met alleen R1 en R4 aan het basisschema van de inverterende versterker. R1 is bovendien gelijk aan R4, dus de trap werkt als inverterende xl-versterker.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12
Hoofdstuk 4/7.43

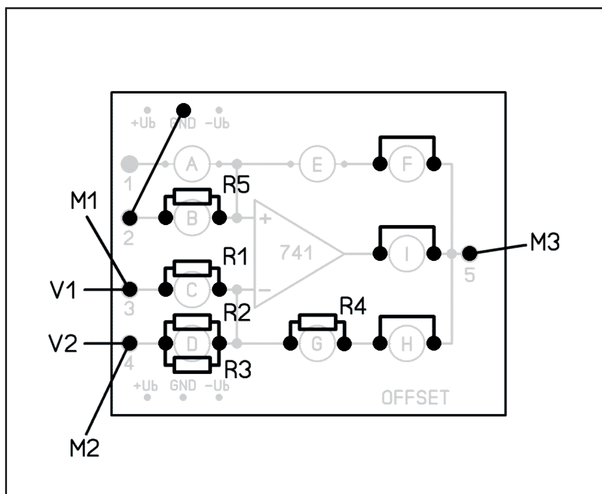


97.6 De op-amp als mengversterker



Figuur 3/97.6-1: Het schema van een tweekanaals menger.

Hetzelfde verhaal geldt als u U1 gelijk aan nul maakt en een spanning aanbiedt aan de tweede ingang. Maar daar R2 en R3 parallel staan, voldoet de trap aan het schema van een x(-2)-versterker. Vandaar zult u -4 V op de uitgang meten, als u +2 V op de ingang aanlegt.



Figuur 3/97.6-2: De menger op uw experimenteerprint.

We gaan écht mengen
Wat nu, als u op beide ingangen van nul afwijkende spanningen zet? De twee afzonderlijke inverterende versterkers werken dan samen en het gevolg is dat de uitgangsspanning gelijk wordt aan de algebraïsche som van beide deeluitgangssignalen.
In de tabel van figuur 3/97.6-3 zijn enige voorbeelden gegeven. Stel U1 en U2 in op +1 V. De verschilversterker met alleen ingang 1 zou een spanning van -1 V aan de uitgang leveren. Zijn soortgenoot met alleen U2 zou, werkend als x(-2)-versterker, een uitgangsspanning van -2 V opwekken. De uitgangsspanning van de totale schakeling is gelijk aan de som, dus -3 V.
Een en ander is ook meer theoretisch te verklaren. De wet van Kirchhoff stelt dat stroom I3 gelijk is aan de som van I1 en I2. Met dit gegeven als uitgangspunt en de wet van Ohm als hulp, komt u er vrij

97.6 De op-amp als mengversterker

snel achter dat voor de uitgangsspanning geldt:

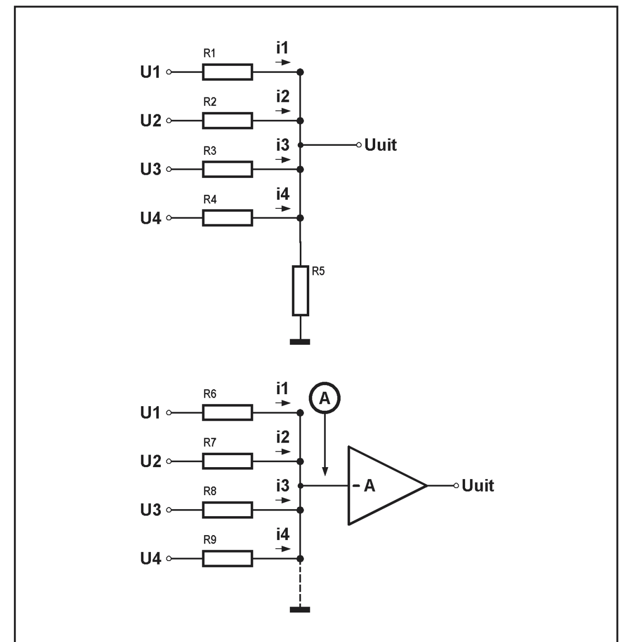
$U_{uit} = -(U_1 + 2 * U_2)$

U1	U2	Uuit
0 V	0 V	0 V
+2 V	0 V	-2 V
0 V	+2 V	-4 V
+1 V	+1 V	-3 V
-2 V	+1 V	0 V
+5 V	-5 V	+5 V
Uuit = - (U1 + 2 * U2)		

Figuur 3/97.6-3: Het verband tussen de in- en uitgangsspanningen, zoals u het op uw analoge trainer proefondervindelijk kunt vaststellen.

Besluit
Aan de uitgang van de menger verschijnt een spanning, die gelijk is aan het inverse van de som van de ingangsspanningen, ieder vermenigvuldigd met de eigen specifieke versterkingsfactor. Deze factor is afhankelijk van de verhouding R4 tot de weerstand tussen de negatieve ingang van de op-amp en de ingang, waarover u het heeft.

Actieve contra passieve menger
Wat is het grote voordeel van deze mengversterker boven de reeds in de inleiding genoemde resistieve menger?
Figuur 3/97.6-4 vergelijkt de basisschema's. Boven de resistieve passieve menger, onder de actieve menger met operationele versterker. In het eerste geval ontstaat het mengeffect door de spanningsvallen, die de diverse ingangsstromen opwekken over de mengweerstand R5. In principe gaat dit prima, maar het nadeel is dat alle ingangen elkaar enigszins beïnvloeden. Ga maar na: stel dat U1 spanning voert en alle overige ingangen nul zijn. De stroom I1 zal dan niet alleen via weerstand R5 afvloeien, maar ook via R2, R3 en R4. Deze stromen kunnen de schakelingen, die op U2, U3 en U4 zijn aangesloten gaan beïnvloeden.

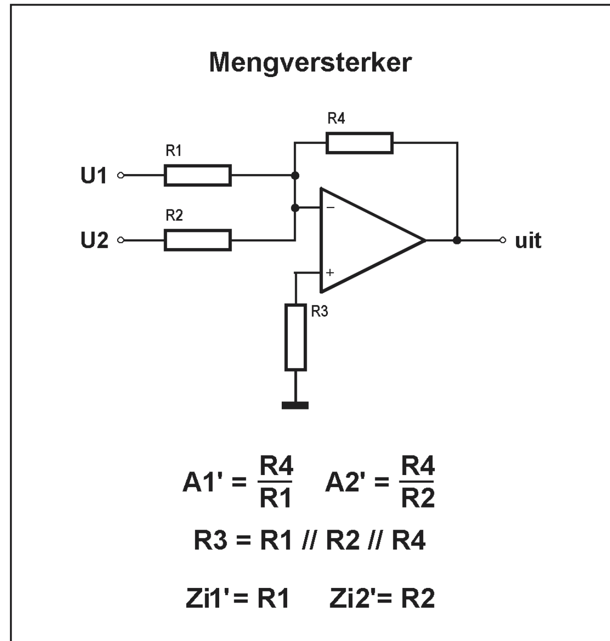


Figuur 3/97.6-4: Vergelijking van de passieve en de actieve menger.

Een tweede nadelige eigenschap van de resistieve menger is de niet te verhinderen signaalverzwakking. Tussen een ingang en de uitgang staat steeds een weerstandsdeler. Voor ingang U1 is deze deler opgebouwd uit R1 en de parallel schakeling van R2, R3, R4 en R5. Het grootste gedeelte van de spanning valt over R1, er blijft erg weinig signaal over aan de uitgang.
Nu de actieve menger.

97.6 De op-amp als mengversterker

Deze heeft geen last van al die problemen. Immers, het mengpunt staat op massapotentiaal, zonder echt met de massa verbonden te zijn. Men noemt zo'n punt een "virtueel massapunt". Het gedraagt zich als massa, de spanning op het punt is steeds nul, maar toch is het niet echt met de massa van de schakeling verbonden. Door dit virtueel massapunt zullen de diverse ingangen elkaar niet kunnen beïnvloeden. De stroom door en van de mengweerstanden wordt alleen maar bepaald door de grootte van de op die ingang aangesloten spanning en verder door niets. Verder zal de schakeling geen signaalverzwakking tot gevolg hebben. Om deze twee redenen worden goede mengtrappen steeds volgens het principe van de inverterende versterker opgebouwd.



Figuur 3/97.6-5: Samenvatting van de eigenschappen van de mengversterker.

Samenvatting

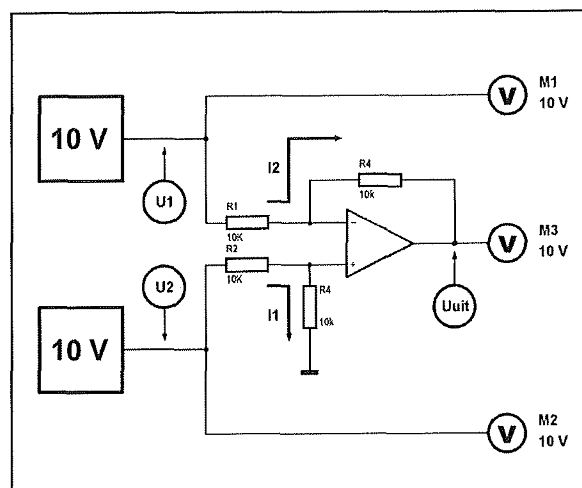
Figuur 3/97.6-5 geeft het bekende tabellarisch overzicht van de eigenschappen van de schakeling.

3/97.7

De op-amp als rekenschakeling

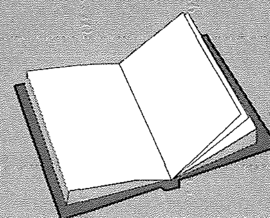
A - B = C, of de op-amp kan rekenen
De in het vorige experiment beschreven menger was in feite niets meer dan een optelschakeling, die de waarde van twee ingangsspanningen bij elkaar optelde. De in dit zevende experiment beschreven verschilversterker is ook een rekenkundige schakeling, die de bewerking
A - B = C
uitvoert, waarbij A, B en C staan voor spanningen. De momentele waarde van één spanning wordt afgetrokken van de momentele waarde van een tweede en het resultaat wordt onder de vorm van een verschilspanning aan de uitgang gepresenteerd.

Het basisschema
Figuur 3/97.7-1 geeft het basisschema van de verschilversterker. Deze schakeling wordt gekenmerkt door vier identieke weerstanden, die op de getekende wijze met de op-amp worden verbonden. R1 is geschakeld tussen de eerste ingang en de inverterende ingang van de op-amp, R2 staat tussen de tweede ingang en de positieve ingang van de versterker, R3 is als terugkoppelelement opgenomen tussen de uitgang en de ingang van de operationele versterker en R4 staat gewoon tussen de + ingang en de massa geschakeld. Voorwaarde voor een goede werking is dat alle weerstanden aan elkaar gelijk zijn, zodat in de praktijk meestal 1 % weerstanden worden gebruikt.



Figuur 3/97.7-1: De basisschakeling van een verschilversterker.

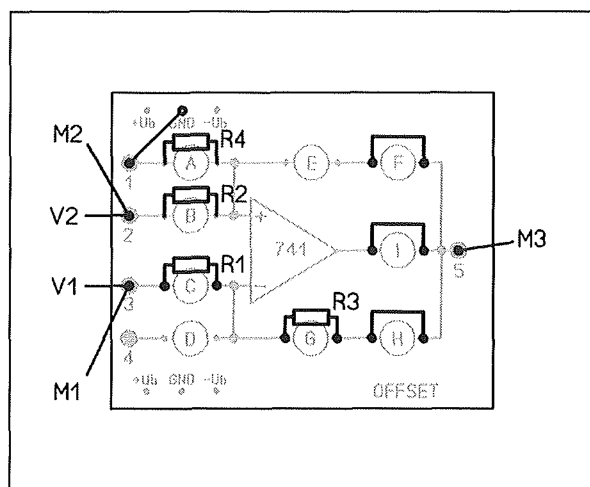
LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12
Hoofdstuk 4/7.43



97.7 De op-amp als rekenschakeling

De schakeling op uw experimenteerprint

Aan de hand van figuur 3/97.7-2 zal het u wel niet veel moeite kosten deze verschilversterker op een van uw experimenteerprinten op te bouwen.



Figuur 3/97.7-2: De verschilversterker op uw experimenteerprint.

U1	U2	Uuit
0 V	0 V	0 V
+1 V	0 V	-1 V
0 V	-1 V	-1 V
-1 V	-1 V	0 V
-5 V	+1 V	+6 V
-9 V	-5 V	+4 V
Uuit = U2 - U1		

Figuur 3/97.7-3: In deze tabel worden spanningsvoorbeelden gegeven die u op uw analoge trainer gemakkelijk kunt instellen.

We schreven dat het gebruik van 1 % weerstanden wordt aanbevolen. Dat is alleen écht noodzakelijk als het er op aan komt twee spanningen zeer nauwkeurig van elkaar af te trekken. Voor de schakelingen op uw experimenteerprint is die absolute nauwkeurigheid niet nodig, zodat u vier normale weerstanden van 5 % en 10 kΩ uit het laatje kunt halen.

Meten maar!

In de tabel van figuur 3/97.7-3 hebben wij een paar voorbeelden gegeven van geschikte spanningen die we, nadat we de schakeling op de experimenteerprint hebben opgebouwd, van elkaar kunnen aftrekken. Stel de spanningen in aan de hand van de meters M1 en M2 en lees het resultaat af op M3.

De werking van de schakeling

De werking van de schakeling berust, het wordt vervelend, op het door de operationele versterker wegregelen van spanningsverschil tussen zijn beide ingangen.

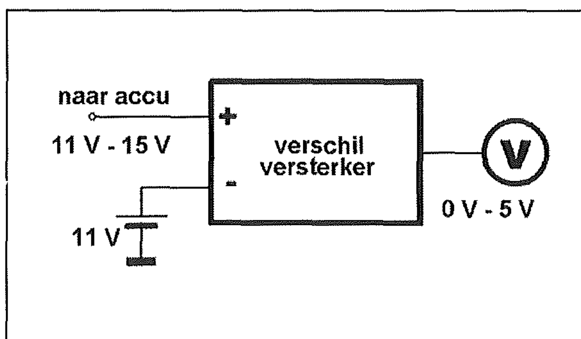
Stel dat we U1 instellen op -1 V en U2 op +2 V.

De positieve ingang van de op-amp staat dan op een spanning van +1 V. De weerstanden R2 en R4 vormen immers een spanningsdeler. Bovendien zijn beide weerstanden aan elkaar gelijk, zodat hun knooppunt op de helft van de ingangsspanning staat. De schakeling zal de uitgangsspanning zó regelen, dat via de terugkoppelweerstand R3 dezelfde spanningsgrootte op de negatieve ingang verschijnt. Over weerstand R1 staat bijgevolg een spanning van 2 V, want de linker aansluiting voert -1 V en de rechter +1 V. De stroom I2 doorloopt R1 en R3. Beide weerstanden zijn even groot, de door de stroom opgewekte spanningsvallen eveneens. Over R3 valt ook 2 V, waarbij de linker aansluiting negatief is ten opzichte van de rechter. De linker aan-

97.7 De op-amp als rekenschakeling

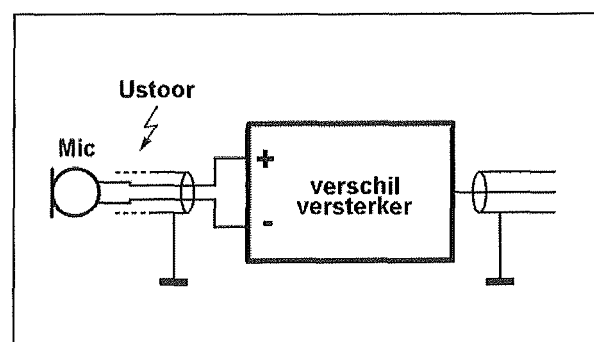
sluiting staat op +1 V, de rechter staat bijgevolg op +3 V. Dat is dan ook de uitgangsspanning van de verschilversterker.
De schakeling heeft de wiskundige bewerking:
$U_{uit} = U_2 - U_1$
uitgevoerd.
Ga maar na:
+2 V - (-1 V) = +2 V + 1 V = +3 V

Toepassingen
De verschilversterker is een zeer handige schakeling, die u vaak uit schijnbaar onoplosbare problemen komt bevrijden. Eén toepassing van de verschilversterker is getekend in figuur 3/97.7-4. Als we de conditie van een accu willen weten, meten we de klemspanning. Voor een goede accu ligt die tussen 11 V en 15 V. Met een normaal meetinstrumentje hebben we een schaalindeling van 0 V tot +15 V, waarbij het nuttige meetgebied slechts één derde van de schaal beslaat.



Figuur 3/97.7-4: Een verschilversterker, toegepast voor het onderdrukken van het nulpunt van een meter.

We kunnen nu door het tussenschakelen van een verschilversterker het nulpunt van de meter onderdrukken, waardoor de schaalindeling loopt van +11 V tot en met +15 V. De verschilversterker hoeft van de variërende accuspanning slechts een vaste spanning van +11 V af te trekken. De uitgang van de versterker zal dan variëren tussen 0 V en +5 V. De meter heeft dan in feite een schaal die loopt van 0 V tot +5 V, maar in werkelijkheid ijken we de schaal natuurlijk van +11 V tot +15 V. Dit geeft een duidelijker en breed uitgesmeerde aflezing van de accuspanning.
Een andere toepassing van de verschilversterker is getekend in figuur 3/97.7-5. Als u kleine signalen over lange afstanden moet transporteren is de bekende afgeschermde kabel niet zo geschikt. Ondanks de afscherming pikt deze toch nog stoorsignalen op. Het is dan aan te bevelen te werken met symmetrisch transport. De twee aansluitingen van de signaalbron, bijvoorbeeld een microfoon, worden getransporteerd via een symmetrische kabel. De afscherming zit nu rond beide aders. Het voordeel is dat stoorsignalen nu in even grote mate in beide aders terecht komen.



Figuur 3/97.7-5: Een verschilversterker zet een symmetrisch signaal om in aan asymmetrisch signaal.

Voor de verdere signaalverwerking heeft u echter weer een asymmetrisch signaal nodig, één hete ader die spanning voert ten opzichte van de massa. Met behulp van een verschilversterker kan dat en bo-

97.7 De op-amp als rekenschakeling

vendien raakt u eventuele stoorsignalen kwijt.
Een voorbeeldje maakt dat duidelijk.
Stel dat, in het voorbeeld van figuur 3/97.7-5, de twee symmetrische aders signalen voeren van:

$U_{ader\ 1}$: $U_a + U_{stoor}$

$U_{ader\ 2}$: $U_b + U_{stoor}$

Beide signalen hebben dus en stoorpuls opgepikt.
Op de uitgang van de verschilversterker staat:

$U_{uit} = U_{ader1} - U_{ader2}$

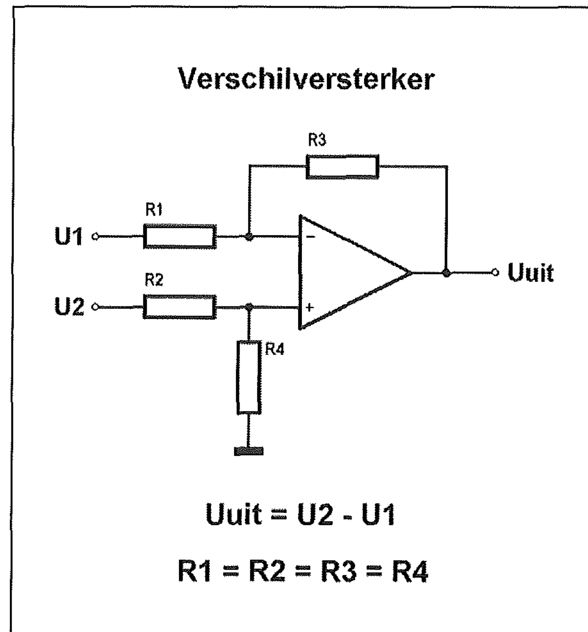
$U_{uit} = (U_a + U_{stoor}) - (U_b + U_{stoor})$

$U_{uit} = U_a - U_b$

Het stoorsignaal is dus uit de signaalspanning verdwenen!

Samenvatting

Figuur 3/97.7-6 geeft een samenvatting van de beschreven eigenschappen van de verschilversterker.



Figuur 3/97.7-6: Samenvatting van de eigenschappen van een verschilversterker.

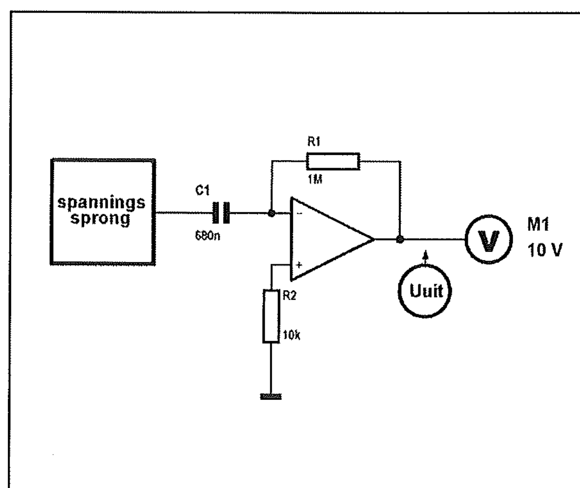
3/97.8

De op-amp als differentiator

We gaan differentiëren!
Volgens het technisch woordenboek is een differentiator een schakeling, waarvan de uitgangsspanning recht evenredig is met de snelheid waarmee de ingangsspanning van waarde verandert. Leggen we aan een differentiator een constante spanning aan (een spanning die niet van waarde verandert in functie van de tijd), dan zal de uitgangsspanning van de differentiator nul zijn. Verandert de ingangsspanning zeer snel van grootte, dan zal differentiator een maximale uitgang leveren.

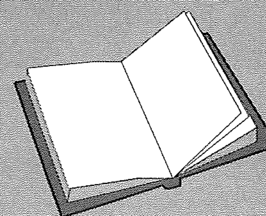
Het basisschema
Het basisschema van de differentiator met operationele versterker is getekend in figuur 3/97.8-1. Een condensator C1 is geschakeld tussen de ingang en de inverterende ingang van de op-amp. De uitgang is door middel van een grote weerstand naar de inverterende ingang teruggekoppeld. De positieve ingang ligt aan de massa, via een weerstand R2.

Op de experimenteerprint
Bouw deze schakeling volgens figuur 3/97.8-2 op de experimenteerprint. Verbind de uitgang met een van de meters en de ingang met een van de twee gelijkspanningsuitgangen. Bij het aanschakelen van het apparaat gaat de uitgang naar nul volt. Verdraai nu de potentiometer, die de waarde van de ingangsspanning bepaalt en let op de reactie van de meter.



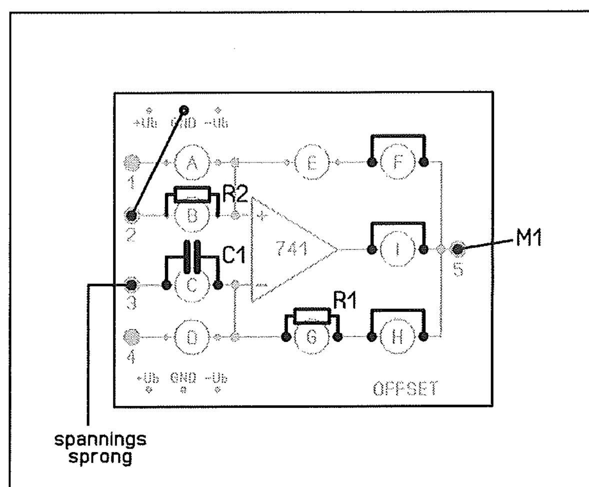
Figuur 3/97.8-1: Het basisschema van de differentiator.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12
Hoofdstuk 4/7.43



97.8 De op-amp als differentiator

Telkens als u aan de potentiometer draait, zult u de meter even zien uitslaan. Als u de potentiometer met rust laat, gaat de uitgang weer naar nul. Hoe sneller u de potentiometer verdraait, met andere woorden hoe sneller de waarde van de ingangsspanning verandert, hoe groter de uitslag van de meter en hoe meer uitgangsspanning de differentiator opwekt.
Deze werking voldoet dus volledig aan de definitie van de differentiator!



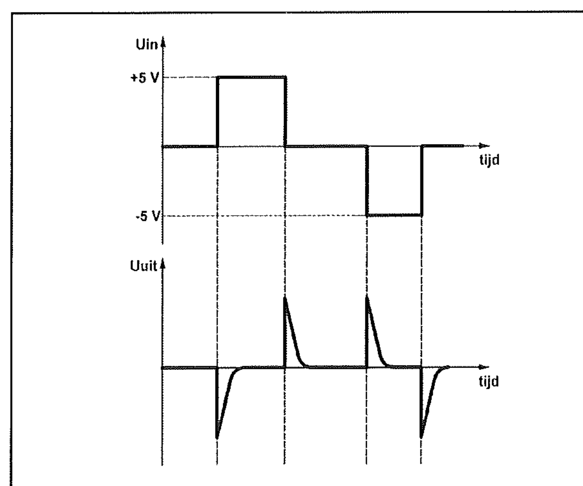
Figuur 3/97.8-2: De differentiator op uw experimenteerprint.

Tweede experiment

Wat kunnen we met zo'n op eerste zicht vrij vreemde schakeling in de praktijk doen? We kunnen er bijvoorbeeld spanningssprongen mee detecteren. Verbind de ingang van het experiment met de spanningssprong uitgang van de universele analoge trainer en stel de twee gelijkspanningen van de trainer in op +5 V respectievelijk -5 V.
Als u niets doet, dan is de uitgangsspanning van de schakeling nul. Logisch, want er treedt geen spanningsverandering aan de ingang op. Druk nu een van de drukknopjes in, waardoor de ingangsspanning plotseling naar +5 V of naar -5 V gaat. De uitgang reageert prompt en wekt een smalle negatieve of positieve puls op. Als de ingangsspanning een positieve sprong doorloopt, dan zal de uitgangsspanning een negatieve puls opwekken. Er zit dus een inverterende werking in de schakeling, wat ons niet hoeft te verbazen, want de ingangsspanning is aangesloten op de inverterende ingang van de op-amp!

Grafische voorstelling

In figuur 3/97.8-3 is de werking van de schakeling grafisch voorgesteld.



Figuur 3/97.8-3: De werking van de differentiator grafisch voorgesteld.

Toepassingen

Differentiatoren worden vaak toegepast in de elektronica. Een differentiator is dé basisschakeling, die ervoor zorgt dat onze TV een stabiel, stilstaand beeld opwekt. Een tweede toepassingsvoorbeeld is een spetteronderdrukker waarmee het geluid, veroorzaakt door krassen en stofdeeltjes op oude LP's, kan worden onderdrukt. De snelle spanningsvariatie in het geluidssignaal, veroorzaakt door de kras of het stofdeeltje, wordt door een

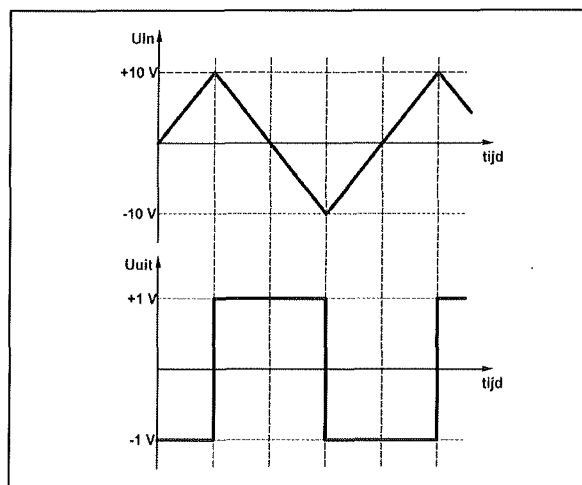
97.8 De op-amp als differentiator

differentiator uit het geluidssignaal gefilterd. De uitgangsspanning van deze schakeling schakelt de versterker dan even uit, zodat de kras niet meer zo storend overkomt.

Van driehoek naar blok

Figuur 3/97.8-4 geeft een andere toepassing van de differentiator, namelijk het omzetten van driehoekspanningen in blokken. Dat kunnen we ook simuleren op de trainer, dit apparaat heeft immers een ingebouwde functiegenerator, die driehoeken opwekt.
Sluit de uitgang van de generator aan op de differentiator. Bij een specifieke frequentie en grootte van de driehoek zal de uitgang van de differentiator een blokspanning opwekken, die symmetrisch verloopt ten opzichte van de nul. Dit ziet u aan de meter die de uitgangsspanning meet, de naald zwiept heen en weer.

Ook dit gedrag is simpel te verklaren. De driehoekspanning varieert lineair in de tijd. Dat wil zeggen dat de spanningsdaling of -stijging per tijdseenheid constant blijft. De differentiator reageert op deze constante spanningsvariatie door het opwekken van een constante spanning.



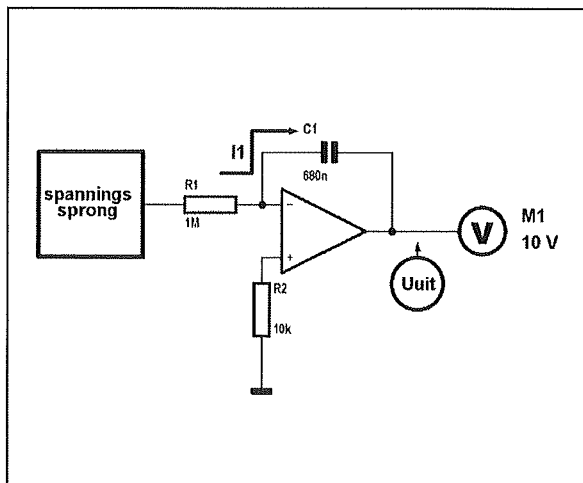
Figuur 3/97.8-4: Het omzetten van een driehoek in een blokspanning met behulp van onze differentiator.

97.8 De op-amp als differentiator

3/97.9

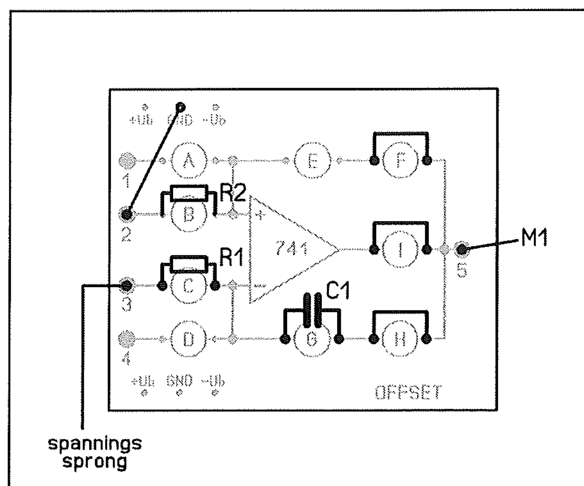
De op-amp als integrator

Weerstand en condensator verwisselen
De differentiator van hoofdstuk 3/97.8 was de eerste schakeling, waar we een condensator gebruikten rond de op-amp. Ook de integrator ontleent zijn specifieke eigenschappen aan het toepassen van een condensator. Kijk maar naar figuur 3/97.9-1, waar we het basisschema van een integrator ontdekken. We herkennen veel gelijkenis met de differentiator, alleen de plaats van R en C is omgedraaid. De grote weerstand staat nu tussen de ingang van de schakeling en de inverterende ingang van de op-amp en de condensator koppelt de uitgangsspanning terug naar de inverterende input.



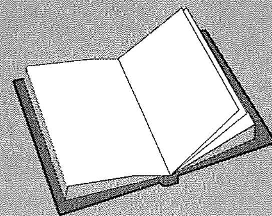
Figuur 3/97.9-1: Het basisschema van de integrator.

De integrator op de experimenteerprint
Aan de hand van figuur 3/97.9-2 kunt u de schakeling op een van uw experimenteerprinten opbouwen.



Figuur 3/97.9-2: De integrator in de praktijk.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12
Hoofdstuk 4/7.43

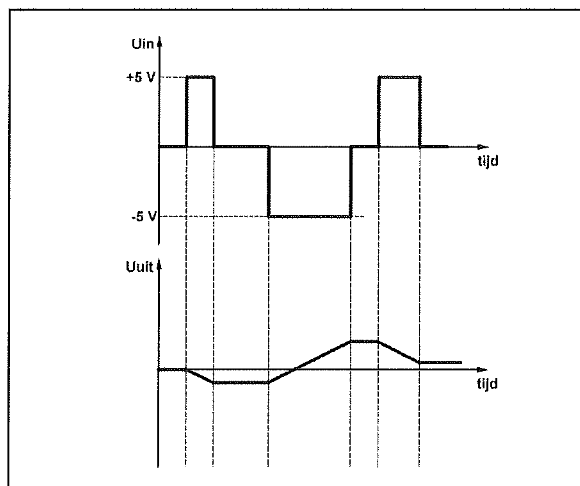


97.9 De op-amp als integrator

Opmerking
Deze schakeling is zeer gevoelig voor offsetfouten, het is absoluut noodzakelijk een offset-gecompenseerde op-amp toe te passen! Uit de vorige experimenten weet u ondertussen hoe dat compenseren in zijn werk gaat.

Experimenteren met de schakeling
We gebruiken de spanningssprong uitgang van de analoge trainer als ingang voor de integrator. Door inschakelverschijnselen bij het aanschakelen van de voeding kan het voorkomen dat de uitgangsspanning een van nul afwijkende waarde aanneemt. Is dat het geval, dan moet u de condensator even kortsluiten, waarna de uitgang naar nul gaat en op deze waarde blijft. Druk nu enige seconden op een van de knopjes voor het opwekken van een spanningssprong. De uitgangsspanning van de schakeling zal langzaam variëren. Na het loslaten van de knop blijft de spanning op de uitgang constant op de laatst gemeten waarde. Druk nu het andere knopje in. De uitgangsspanning gaat weer langzaam van waarde veranderen, maar nu in tegengestelde richting. Een en ander is grafisch weergegeven in figuur 3/97.9-3.
Herhaal de experimenten met andere waarden voor de grootte van de spanningssprong. Stel vast dat de snelheid van de spanningsvariatie op de uitgang afhankelijk is van de grootte van de sprong aan de ingang. Noteer verder het inverterende karakter van de schakeling: een positieve sprong aan de ingang wekt een dalende uitgangsspanning op!

De werking van de schakeling
Hoe is dit te verklaren? Door het aanleggen van een spanning aan de ingang stuurt u een stroom I door de weerstand R1. Omdat de positieve ingang van de op-amp aan massa ligt, zal ook de inverterende ingang op massapotentiaal staan.



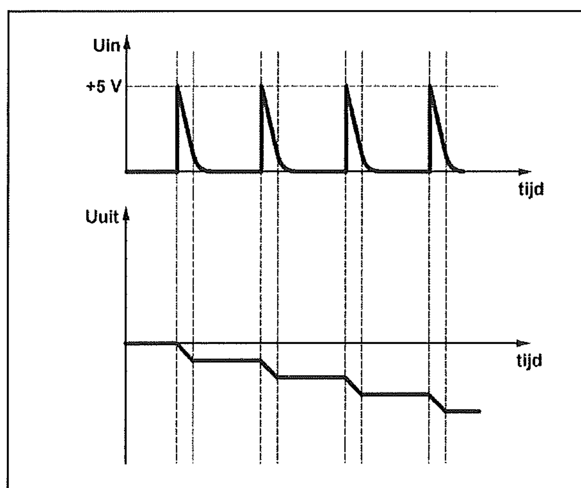
Figuur 3/97.9-3: De werking van de integrator grafisch toegelicht.

De grootte van de stroom wordt alleen bepaald door de waarde van R1 en door de grootte van de ingangsspanning. De inwendige weerstand van de op-amp is zeer groot, zodoende kan de stroom I alleen maar via de condensator naar de uitgang van de schakeling vloeien. Nu weet u ongetwijfeld dat een condensator, die wordt doorlopen door een constante stroom, over zichzelf een lineair stijgende (of dalende) spanning opbouwt.
Dat nu, is hier het geval. De stroom I is constant, zolang u de ingangsspanning niet varieert. De linker plaat van de condensator ligt aan de massa (virtueel nulpunt). De spanning op de rechter plaat en dus aan de uitgang van de schakeling zal lineair stijgen of dalen. De integrator is als het ware een schakeling, die onthoudt hoeveel spanning er gedurende een bepaalde tijd aan de ingang wordt aangeboden.

97.9 De op-amp als integrator

Toepassingen

Met een integrator kunt u een aantal gelijke pulsen omzetten in een gelijkspanning, waarvan de grootte recht evenredig is met het aantal pulsen per tijdseenheid. Experimenteer maar even met de trainer, dan wordt het wel duidelijk! Kijk ook even naar figuur 3/97.9-4, waar dit principe grafisch is voorgesteld.

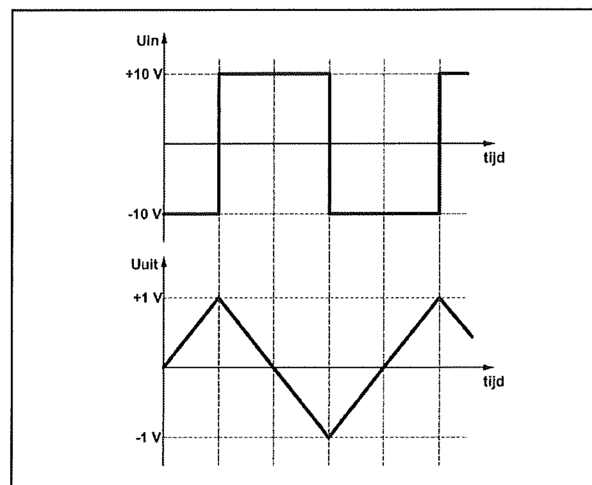


Figuur 3/97.9-4: Het omzetten van een aantal pulsen in een stijgende spanning.

Misschien verwacht u dat de spanning op de uitgang constant blijft als er geen ingangsspanning wordt aangeboden. Op de trainer kunt u echter vaststellen dat de uitgangsspanning zeer langzaam gaat dalen of stijgen. Dit wordt in de eerste plaats veroorzaakt door de lekstroom van de condensator, de condensator ontlaadt zichzelf. In de tweede plaats zijn de karakteristieken van operationele versterkers niet zo ideaal als we voor het gemak aannemen. Tussen de inverterende ingang en de uitgang staat een weliswaar zeer hoge, maar toch aanwezige weerstand. Deze weerstand staat parallel over de condensator en zal dit onderdeel langzaam ontladen. Verder zal een niet volledig gecompenseerde offset er voor zorgen dat de uitgangsspanning langzaam gaat dalen of stijgen.

Van blok naar driehoek

In figuur 3/97.9-5 is een andere toepassing van de integrator grafisch weergegeven. Als we een blokgolf aan de ingang aanleggen, dan zullen we een driehoek aan de uitgang kunnen aftakken. Ook hiermee kunnen we naar hartelust experimenteren op de trainer!



Figuur 3/97.9-5: Het omzetten van een blokgolf in een driehoekspanning.

Opmerking

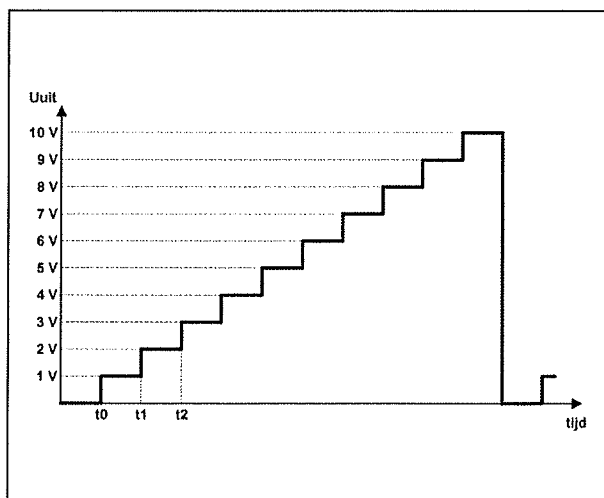
In het volgende experiment zullen we de integrator gebruiken als hart van een functiegenerator, een schakeling waarmee we de driehoeken en blokgolven kunnen opwekken en die in basis ook gebruikt wordt in het in de trainer ingebouwde 2207 functiegenerator IC.

97.9 De op-amp als integrator

3/97.10

De op-amp als trapspanningsgenerator

Een trapspanning
Hoewel we experiment 3/97.9 besloten met de belofte in dit proefje de werking van de functiegenerator te bespreken, lassen we drie extra experimentjes in. Dit eerste beschrijft een niet zo bekende toepassing van de integrator. De volgende twee bereiden ons voor op de werking van de functiegenerator.
Een trapspanning ziet er uit zoals getekend in figuur 3/97.10-1. Zo'n spanning wordt gekarakteriseerd door het gegeven dat de grootte op geregelde tijden een bepaalde, vaste waarde stijgt of daalt. In het eerste geval spreken we van een positieve trapspanning, in het tweede van een negatieve.

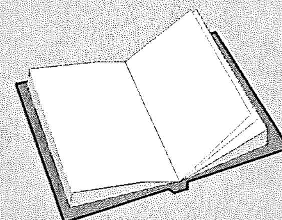


Figuur 3/97.10-1: Portret van een positieve trapspanning.

Op het tijdstip t0 wordt de getekende spanning 1 V. Dat blijft zo tot t1. Op dat moment wordt de spanning opeens 1 V groter en wordt dus 2 V. Dit blijft stabiel tot tijdstip t2, waarop de spanning verhoogd wordt tot 3 V.
Natuurlijk kan dat niet eeuwig blijven doorgaan, vandaar dat na tn de spanning in elkaar stort tot 0 V en een nieuwe cyclus kan beginnen.

Toepassingen
Dergelijke trapvormige spanningen worden gebruikt in de professionele elektronica voor het sturen van een spot naar diverse plaatsen op een beeldscherm, het omzetten van spanningen in frequenties en het versturen van diverse kanalen over één kabel. De hobbyist komt dit soort signalen tegen in bijvoorbeeld muzikale deurbellen, waarbij de trapspan-

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.8

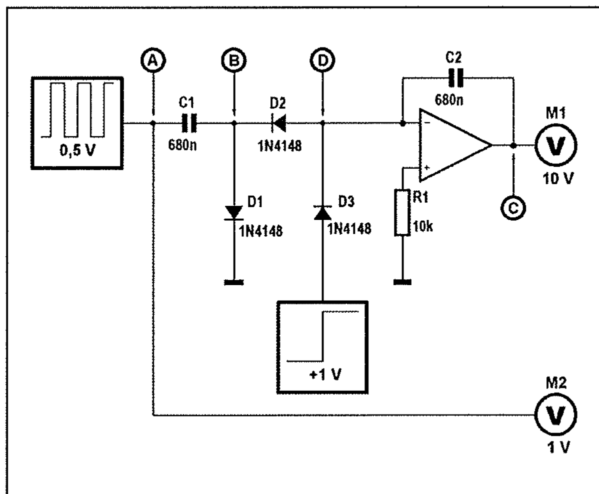


97.10 De op-amp als trapspanningsgenerator

ning een frequentiegenerator stuurt en iedere trap overeen komt met één muziektoontje.

Het schema

Het schema, waarmee we op de universele analoge trainer een trapspanning kunnen genereren is getekend in figuur 3/97.10-2.
We herkennen de basiseigenschap van een integrator: een condensator tussen de inverterende ingang en de uitgang van de op-amp. Op de ingang sluiten we de uitgang van de ingebouwde functiegenerator aan, geschakeld op blokspanning met een grootte van ongeveer 0,5 V.



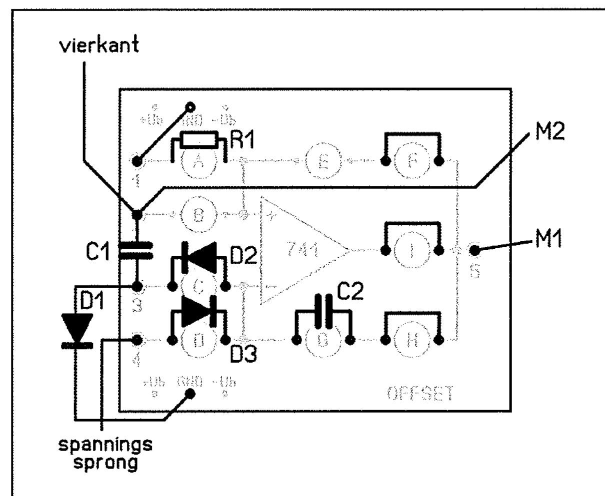
Figuur 3/97.10-2: Het schema van de experimentele trapspanningsgenerator.

Op de experimenteerprint

Het schemaatje kan volgens figuur 3/97.10-3 op de experimenteerprint worden opgebouwd.

Experimenteren

Na het inschakelen van de voedingsspanning zal de uitgang van de op-amp op nul volt staan. Bij iedere negatieve sprong van de ingangsspanning zien we dat de uitgang ongeveer 1 V positiever wordt en op deze waarde blijft tot de volgende negatieve sprong aan de ingang.
De grootte van de trappen aan de uitgang kunnen we instellen door het variëren van de grootte van de blok aan de ingang. Hoe kleiner deze spanning, hoe dichter de diverse trappen van de uitgang bij elkaar liggen.



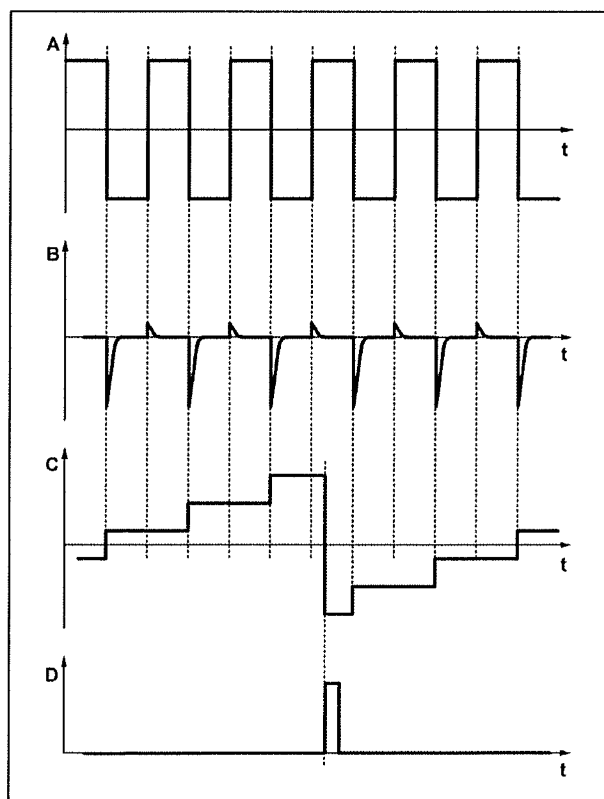
Figuur 3/97.10-3: De schakeling op onze experimenteerprint.

Werking van de schakeling

De grafieken van figuur 3/97.10-4 verduidelijken een en ander. De vierkantsgolf van de functiegenerator wordt gedifferentieerd door de condensator C1. Dat wil zeggen dat dit onderdeel alleen de plotselinge spanningsvariaties van +0,5 V naar -0,5 V (en omgekeerd) doorlaat. Een condensator heeft immers een bepaalde wisselspanningsweerstand. Hoe hoger de frequentie van een signaal, hoe minder weerstand een condensator biedt tegen de doorgang van dit signaal. De spanningsvariaties komen overeen met een signaal met een zeer hoge frequentie en de condensator zal deze delen uit het signaal ongehinderd doorlaten. Anders zit dat met de vlakke

97.10 De op-amp als trapspanningsgenerator

gedeelten van de vierkantsgolf. Deze vertegenwoordigen een zeer lage frequentie en de weerstand van de condensator is dan zo hoog, dat dit signaal volledig wordt gesperd. Besluit: de vierkantsgolf van de functiegenerator wordt door de condensator omgezet in korte positieve en negatieve pieken, zogenaamde naaldimpulsen. Nu komt echter diode D1 op de proppen. Dit onderdeel gaat geleiden als de anode positiever is dan de kathode. Dat is het geval bij een positieve naaldpuls. Deze wordt dan ook door de geleidende diode kortgesloten naar de massa. Op punt B ontstaat dus de in figuur 3/97.10-4 getekende spanning: smalle negatieve naaldimpulsjes bij iedere negatieve sprong van de vierkantsgolf op de ingang.



Figuur 3/97.10-4: De grafische verklaring van de werking van de schakeling.

De zeer kleine positieve pulsjes, die u op figuur 3/97.10-4 getekend ziet, worden veroorzaakt door de 0,7 V geleidingsspanning van de diode en zijn de resten van de door de condensator doorgekoppelde positieve overgangen van de blok. Vervolgens laat diode D2 van zich horen. Ook deze diode gaat geleiden als de anode positiever wordt dan de kathode. Dat is het geval bij een negatieve naald op punt B. De negatieve ingang van de op-amp wordt dan door de geleidende diode verbonden met de spanning op punt B.
Het lijkt dan net alsof we de integrator gedurende een zeer korte tijd sturen met een negatief spanning. Zoals we uit het vorige experiment geleerd hebben, reageert de integrator daarop door het lineair opladen van de condensator.
De spanning op de uitgang wordt dan positief (de integrator inverteert immers). Nu gaat dat opladen heel erg snel: tussen de negatieve ingang en de spanning op punt B staat immers geen echte weerstand. Als we deze schakeling vergelijken met deze van figuur 3/97.9-1 uit experiment 9, stellen we vast dat weerstand R1 uit dat experiment nu zo goed als nul is. De diode heeft uiteraard een kleine inwendige weerstand, maar deze is te verwaarlozen. De stroom I, die vanaf punt B door de geleidende diode D2 en de condensator C2 naar de uitgang van de op-amp vloeit is zeer groot en vandaar dat de spanning over de condensator ook zeer snel gaat stijgen. Nadat de spanning over C2 ongeveer 1 V is gestegen, valt de negatieve naaldpuls op punt B weg. De diode D2 gaat sperren, de laadstroom van C2 wordt nul. De spanning over dit onderdeel en dus ook de spanning op de uitgang van de integrator blijft constant.

97.10 De op-amp als trapspanningsgenerator

Bij de volgende negatieve naaldpuls zal er weer heel even een vrij grote stroom door D2 en C2 vloeien, waardoor de spanning over dit laatste onderdeel weer opeens met eenzelfde bedrag stijgt. De volgende trap van de trapspanning is tot stand gekomen.

Het einde van een cyclus

Natuurlijk blijft dit proces zich niet eeuwig herhalen. Na een bepaald aantal stroompulsjes is de condensator opgeladen tot de positieve voedingsspanning en bij volgende negatieve pulsjes blijft de uitgang van de op-amp op +10 V staan. De schakeling loopt vast tegen de positieve voedingsspanning.
Als we nu even via de drukknop en via diode D3 een positief pulsje op de negatieve ingang van de op-amp zetten, wordt de polariteit van de ingangsspanning van de integrator omgepoold, waardoor de laadstroom van C2 omkeert. De spanning daalt nu zeer snel van +10 V naar ongeveer -8 V, de uiterste negatieve limiet van de op-amp.

Na het loslaten van de drukknop zal de uitgangsspanning van de schakeling weer trapvormig oplopen tot +10 V.

Opmerking

Bij een “echte” trapspanningsgenerator wordt dat wat we bij dit experiment met de hand doen, namelijk het beëindigen van een cyclus van de trapspanning, uiteraard elektronisch gedaan. Dat gaat vrij eenvoudig: met een comparator (zie volgend experiment) vergelijken we de waarde van de trapspanning met een bepaalde vaste spanning. Als de trapspanning groter zou willen worden dan dit referentieniveau, wekt de comparator een uitgangsspanning op. Deze spanning stuurt een schakelingetje dat even een positief pulsje aanbiedt aan de negatieve ingang van de op-amp. De uitgang van de schakeling wordt maximaal negatief, de volgende trapspanningsperiode kan worden opgebouwd.

3/97.11

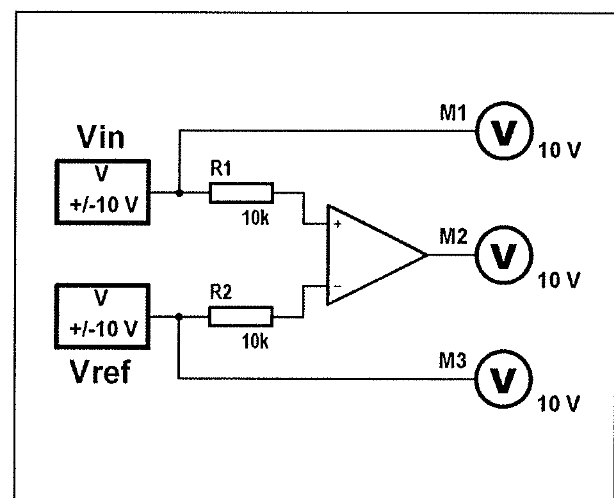
De op-amp als comparator

Inleiding

Compareren betekent vergelijken. We kunnen heel veel dingen met elkaar vergelijken, maar waar we het hier over gaan hebben is het vergelijken van de grootte van twee spanningen. In het vorig experiment hebben we het al even over zo'n schakeling gehad. Vergelijkers of comparators worden vrij vaak toegepast in de elektronica, niet alleen voor het beëindigen van een cyclus van een trapspanning, maar bijvoorbeeld ook voor het resetten van een zaagtandspanning, het omvormen van analoge signalen tot digitaal te verwerken spanningen en het opwekken van alarmsignalen als een bepaalde spanning, die is afgeleid van een temperatuur, een druk of een vloeistofniveau, te hoog wordt.

Het basisschema van een comparator

Het basisschema van een comparator is getekend in figuur 3/97.11-1. Willen we kunnen vergelijken, dan hebben we twee grootheden nodig: eentje die we vergelijken en eentje waarmee we vergelijken. Vandaar dat een comparator altijd twee ingangsspanningen heeft. De spanning U_{in} is de spanning die we willen vergelijken, de spanning U_{ref} is een (meestal) constante spanning waarmee we de U_{in} vergelijken. De ene spanning wordt aangelegd aan de positieve ingang van de op-amp, de andere aan de negatieve ingang.

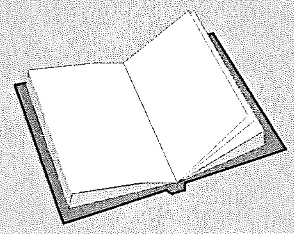


Figuur 3/97.11-1: Het basisschema van een comparator.

Er is geen terugkoppeling opgenomen tussen de uitgang en een van de ingan-

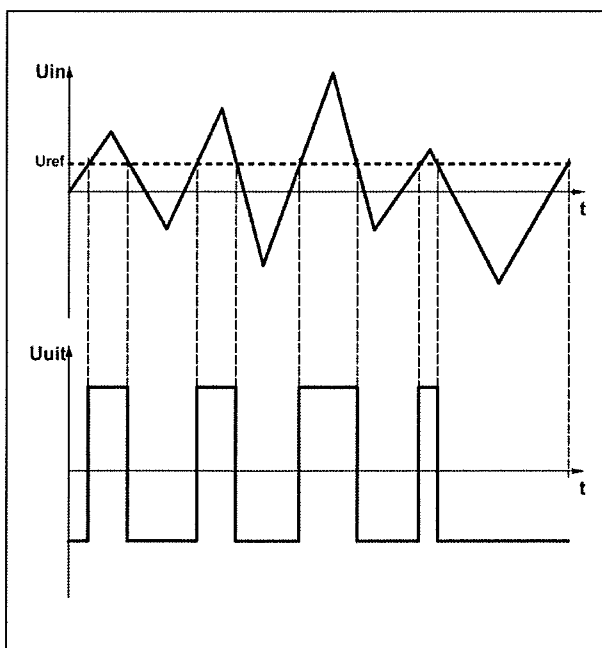
LEES OOK:

Hoofdstuk 3/12.3



97.11 De op-amp als comparator

gen en door dit simpele feit is de werking van de schakeling in feite al duidelijk.
Even terug naar experiment 3/97.1. Daarin leerden we dat een operationele versterker een verschilversterker is, die het spanningsverschil tussen zijn beide ingangen vele malen versterkt. De versterkingsfactor is zo groot, dat zelfs een spanningsverschil van een paar mV tussen de ingangen leidt tot een oversturing van de schakeling, dus tot het vastlopen van de uitgang tegen een van de voedingsspanningen.



Figuur 3/97.11-2: De werking van de schakeling grafisch toegelicht.

Van deze eigenschap maken we gebruik bij de comparator. Stel dat we U_{ref} instellen op +5 V. Als de spanning op de positieve ingang lager is dan die waarde, dan bestaat er een negatief spanningsverschil tussen de positieve en de negatieve ingang van de op-amp. Dit spanningsverschil wordt enige tienduizenden malen versterkt, zodat de uitgang van de schakeling de negatieve voedingsspanning opzoekt. Als we nu de spanning op de positieve ingang langzaam laten stijgen, zal op een bepaald moment het spanningsverschil tussen beide ingangen van polariteit wisselen. De spanning op de positieve ingang wordt dan groter dan de spanning op de negatieve ingang. Ook dit spanningsverschil wordt tienduizenden malen versterkt, waardoor de uitgang van de schakeling opeens omschakelt van tegen de negatieve voedingsspanning naar tegen de positieve voedingsspanning.
Kortom: het overschrijden door U_{in} van de referentiespanning, al is het maar met een paar mV, wordt door de schakeling gedetecteerd en levert een forse spanningssprong op aan de uitgang.

Grafische werking

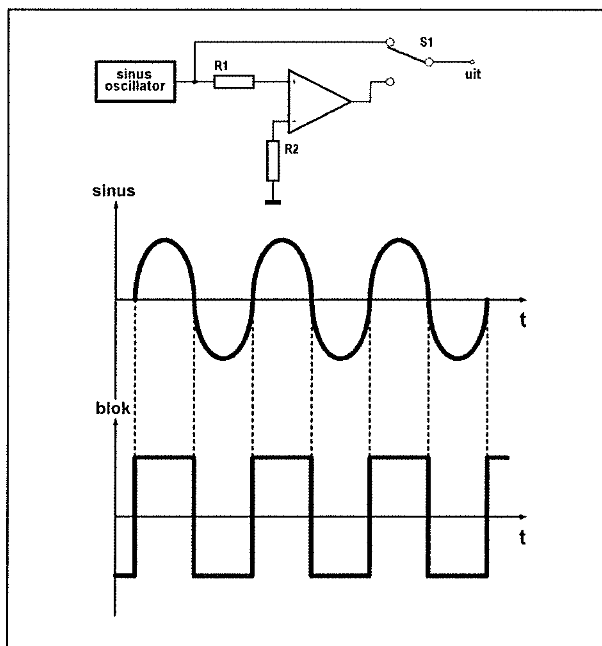
In figuur 3/97.11-2 hebben wij de werking van de schakeling grafisch voorgesteld. De bovenste grafiek geeft het verloop van de ingangsspanning, in dit voorbeeld driehoekvormig. In stippellijn is de referentiespanning U_{ref} ingetekend. De onderste grafiek geeft de uitgangsspanning weer en we zien dat deze positief is de ingangsspanning groter is dan de referentie.

Toepassingen

Figuur 3/97.11-3 laat ons kennis maken met een van de bekendste toepassingen van de comparator: het omzetten van een sinus in een blok. De goedkopere soort signaalgeneratoren, voor een tientje te koop als bouwpakket, die in het laboratorium worden gebruikt voor het opwekken van testspanningen, zijn meestal opgebouwd rond een sinusgenerator. Zo'n sinusspanning is erg handig voor het testen van bijvoorbeeld versterkers, maar soms hebben wij behoefte aan

97.11 De op-amp als comparator

een vierkantsgolf. Door gebruik te maken van een comparator kunt u dit signaal afleiden uit de sinus. De referentiespanning van de comparator wordt dan ingesteld op 0 V, de uitgang schakelt dan telkens om bij de nuldoorgang van de sinus. De sinus wordt omgezet in een mooie symmetrische blokspanning met dezelfde frequentie als de sinus.

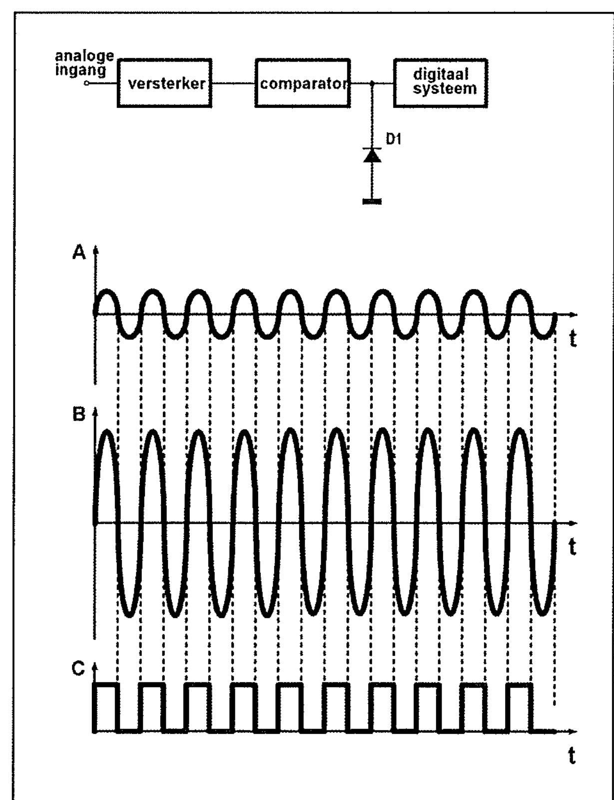


Figuur 3/97.11-3: Het eenvoudigste voorbeeld van de toepassing van een comparator: het omzetten van een sinus in een blok.

Door middel van de omschakelaar S1 kunt u kiezen tussen sinus of blok op de uitgang.

Figuur 3/97.11-4 geeft een andere toepassing van de comparator. Als we de frequentie van een signaal digitaal willen meten, dan zullen we eerst dat signaal zo moeten bewerken dat het geschikt is voor de digitale IC's in het meetsysteem. De analoge ingang wordt daarom eerst versterkt (signaal B) en nadien aangeboden aan een comparator. Deze maakt van het ingangssignaal een puls en deze puls kan door de digitale schakelingen worden verwerkt.

Omdat digitale signalen werken met spanningen van 0 V tot +5 V of tot +12 V, moet de negatieve uitgang van de comparator worden begrensd tot 0 V. Vandaar de diode aan de uitgang, die gaat geleiden als de uitgang van de op-amp negatief wil worden. De meeste op-amp's kunnen deze kortsluiting van hun uitgang bij negatieve uitgangsspanningen zonder meer verdragen.



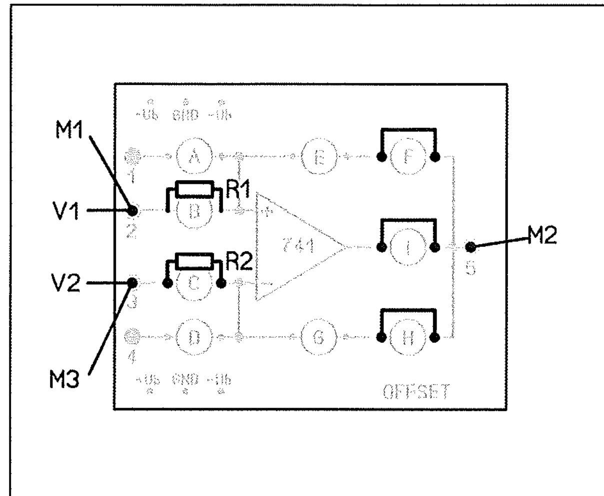
Figuur 3/97.11-4: Het voorbereiden van een analoog signaal op de digitale verwerking ervan.

De comparator op uw trainer

In figuur 3/97.11-5 hebben wij het basisschema van de comparator op de universele analoge trainer opgebouwd. U heeft nu al zoveel ervaring met het experimen-

97.11 De op-amp als comparator

teren met dit apparaat, dat wij er zeker van zijn dat u zonder onze schriftelijke hulp aan de slag kunt met de zeer nuttige comparatorschakeling.



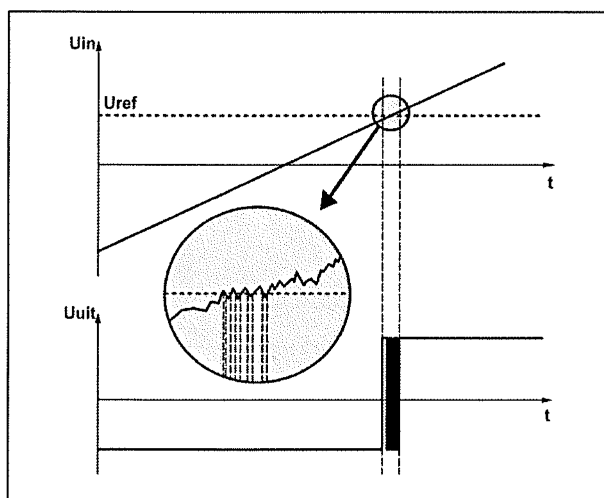
Figuur 3/97.11-5: Het schema van de comparator op de trainer.

3/97.12

De op-amp als comparator met hysteresis

Inleiding

De eenvoudige comparatorschakeling uit het vorige experiment is zo gevoelig, dat we af en toe maatregelen moeten treffen om die gevoeligheid enigszins te temperen. Een spanningsverschil van een paar mV tussen de ingangsspanning en de referentie is voldoende om de uitgang van + naar - te laten omslaan. Soms kan het voorkomen, dat er wat rimpel op de te compareren spanning zit, kijk maar naar figuur 3/97.12-1.



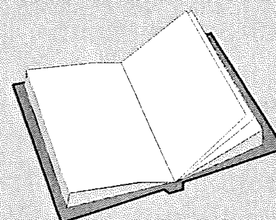
Figuur 3/97.12-1: De noodzaak van hysteresis wordt verduidelijkt aan de hand van dit voorbeeld.

Bij dit voorbeeld wordt de ingangsspanning afgeleid van een niveaudetector van een vloeistoftank. De comparator moet gebruikt worden om het bereiken van een bepaald vloeistofniveau in de tank te detecteren. Het volstromen van de tank veroorzaakt uiteraard golfjes op het oppervlak van de vloeistof en het instrument dat het niveau omzet in een spanning reageert ook op de golfjes. Vandaar dat de spanning die uit de tank komt niet gladjes stijgt met het stijgen van het niveau, maar vrij rimpelig. Ieder golfje in de tank veroorzaakt een rimpel op de spanning.

Zolang deze spanning veel lager is dan de referentiespanning is er niets aan de hand. De uitgang van de comparator is negatief. Als het vloeistofniveau in de buurt van de drempelwaarde komt, zal ook U_{in} de referentie benaderen. Door de golfjes in de tank en de rimpels op de ingangsspanning zal de uitgang van de comparator een aantal malen achter el-

LEES OOK:

Hoofdstuk 3/12.3

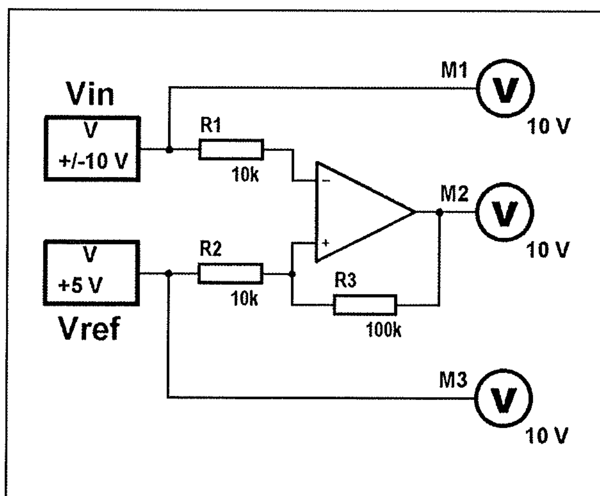


97.12 De op-amp als comparator met hysteresis

kaar omschakelen. De rimpels zorgen er nu immers voor dat de ingangsspanning de ene keer net boven en de volgende keer net onder de referentie zit.
Dat diverse malen omschakelen van de uitgangsspanning kan zeer ongewenst zijn en vandaar dat men een speciale schakeling heeft verzonnen, die eenduidig reageert op het overschrijden van een bepaalde drempel.

Comparator met hysteresis

Dat is de comparator met hysteresis, waarvan het schema getekend is in figuur 3/97.12-2. Het enige verschil met de vorige schakeling is een extra weerstand, geschakeld tussen de uitgang van de op-amp en de positieve ingang.



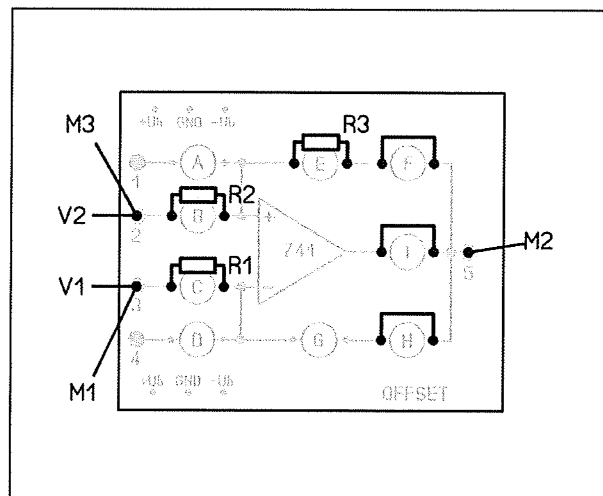
Figuur 3/97.12-2: Het schema van een comparator met hysteresis.

De schakeling op uw trainer

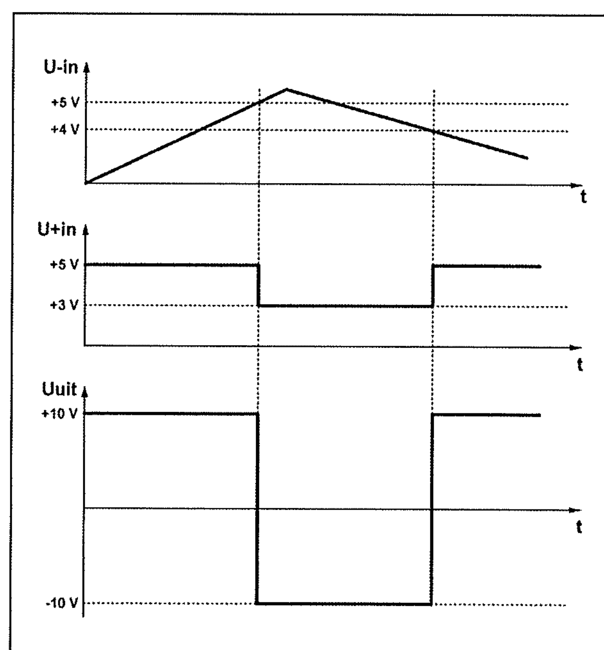
In figuur 3/97.12-3 is voorgesteld hoe u de schakeling op uw experimenteerprint kunt opbouwen.

De werking van de schakeling

De werking van de hysteresis wordt verduidelijkt aan de hand van de grafieken van figuur 3/97.12-4. De te vergelijken spanning wordt nu aangeboden aan de negatieve ingang van de op-amp, de referentie aan de positieve. Stel een referentie in van +5 V, gemeten aan de positieve ingang van de op-amp.



Figuur 3/97.12-3: De comparator met hysteresis op uw experimenteerprint.



Figuur 3/97.12-4: De grafische verklaring van de werking van de schakeling.

97.12 De op-amp als comparator met hysteresis

Als de ingangsspanning lager is, dan is de negatieve ingang van de operationele versterker lager dan 5 V, de uitgang is positief. De ingangsspanning stijgt, na een bepaalde tijd wordt ze iets positiever dan 5 V. De negatieve ingang van de op-amp wordt positief ten opzichte van de niet-inverterende ingang. De uitgang van de schakeling klapt om, wordt dus -10 V. De weerstanden R2 en R3 vormen een spanningsdeler tussen de referentiespanning en de uitgangsspanning. Doordat de uitgang opeens ongeveer 20 V in waarde daalt, zal er over weerstand R3 een grotere spanning vallen. Dat heeft tot gevolg dat de spanning op de positieve ingang daalt. De verhouding van R2 tot R3 zorgt er in dit specifieke geval voor, dat de spanning daalt tot +3 V. Het gevolg is dat de ingangsspanning moet dalen tot deze nieuwe referentiewaarde, alvorens de comparator reageert.

Hysteresisverschijnsel
Het feit dat de comparator nu twee verschillende referentieniveaus heeft, een voor stijgende ingangsspanning en een lagere voor dalende ingangsspanning, noemt men het hysteresisverschijnsel. Het spanningsverschil tussen beide referenties noemt men de hysteresis. De getekende schakeling heeft dus een hysteresis van 2 V.
Het voordeel van dit systeem is duidelijk. Zou de ingangsspanning rimpels vertonen, dan zullen die toch niet een herhaaldelijk omschakelen van de uitgang kunnen veroorzaken. Immers, de schakeling schakelt om op het moment dat de ingangsspanning voor het eerst de bovenste referentie overschrijdt. Automatisch stelt de comparator een lagere referentie in, de volgende rimpels zitten ver boven de nieuwe referentie en de uitgang van de schakeling blijft stabiel. Hetzelfde gebeurt bij de dalende ingangsspanning.

97.12 De op-amp als comparator met hysteresis

3/97.13

De op-amp als functiegenerator

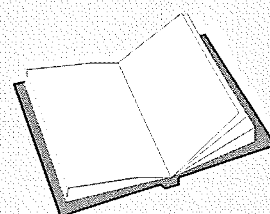
Een functiegenerator
De functiegenerator is het eerste experiment, waarbij we twee operationele versterkers inschakelen en waarvoor het dus nodig is dat twee 741 experimenteerprintjes ter beschikking staan.
Een functiegenerator is een schakeling, die diverse signaalvormen kan opwekken. In de meest eenvoudige uitvoering, zoals besproken in dit experiment, levert de schakeling driehoek- en blokvormige signalen. Meer uitgebreide schakelingen, zoals ingebouwd in de diverse in de handel zijnde functiegeneratoren, leveren daarnaast ook nog eens sinussen, zaagtanden en pulsen.

De basisschakeling
De basisschakeling, getekend in figuur 3/97.13-1, is opgebouwd uit twee reeds bekende trappen. U herkent ongetwijfeld de comparator met hysteresis rond operationele versterker IC1 en de integrator rond IC2. Beide schakelingen hebben we besproken in de hoofdstukken 3/97.12 en 3/97.9.
De comparator levert de stuurspanning voor de integrator, de integrator levert de ingangsspanning voor de comparator. We hebben dus te maken met een rondgekoppeld systeem: de uitgang stuurt de ingang en deze terugkoppeling veroorzaakt het opwekken van een periodiek terugkerende spanning. Anders gezegd: door de terugkoppeling zal de schakeling gaan oscilleren.

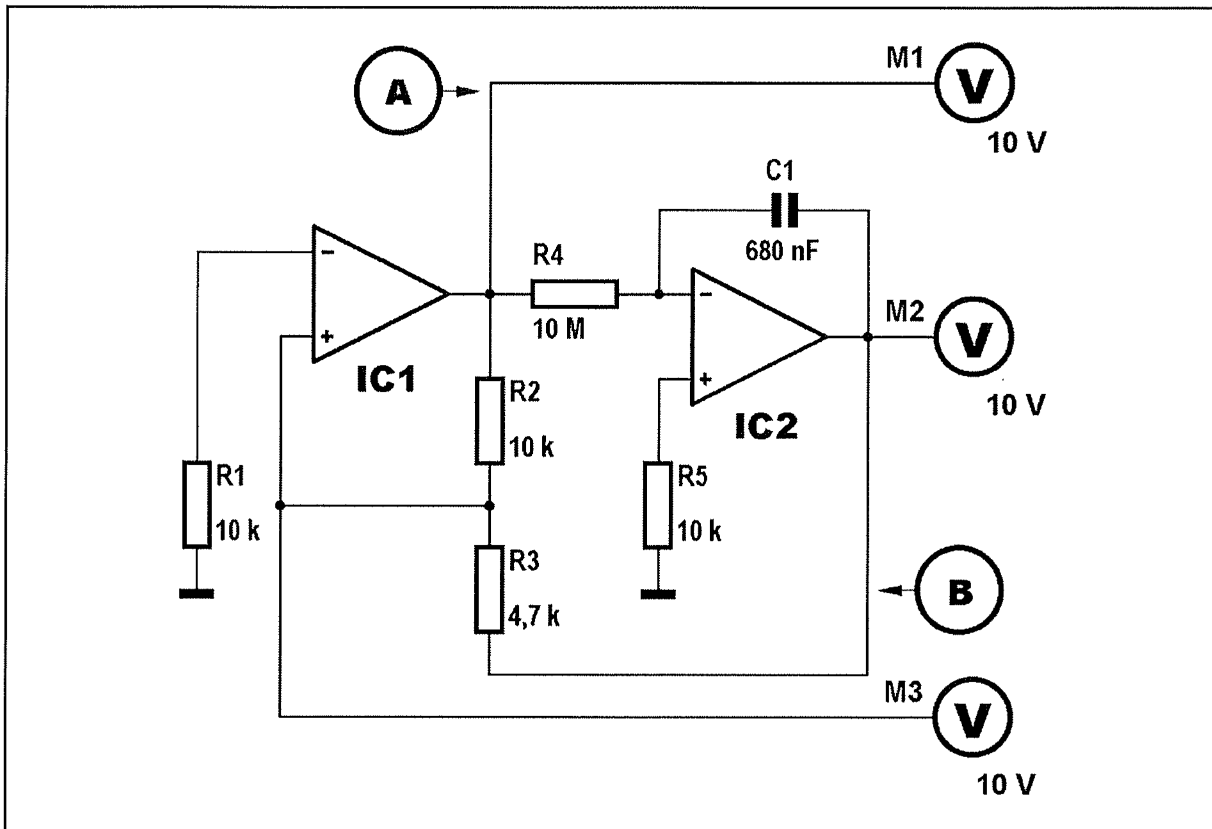
De basisschakeling op de experimenteerprinten
Laten we het schakelingetje opbouwen op twee experimenteerprintjes volgens de bedradingstekening van figuur 3/97.13-2. Als we de trainer met de netspanning verbinden, stellen we vast dat op de uitgang van de schakeling een driehoekvormige spanning ontstaat (meter M2), terwijl op de uitgang van de eerste op-amp (meter M1) een blokvormige spanning verschijnt.

De werking van de schakeling
De werking van deze schakeling wordt verklaard aan de hand van de grafieken uit de figuren 3/97.13-3 en 3/97.13-4.

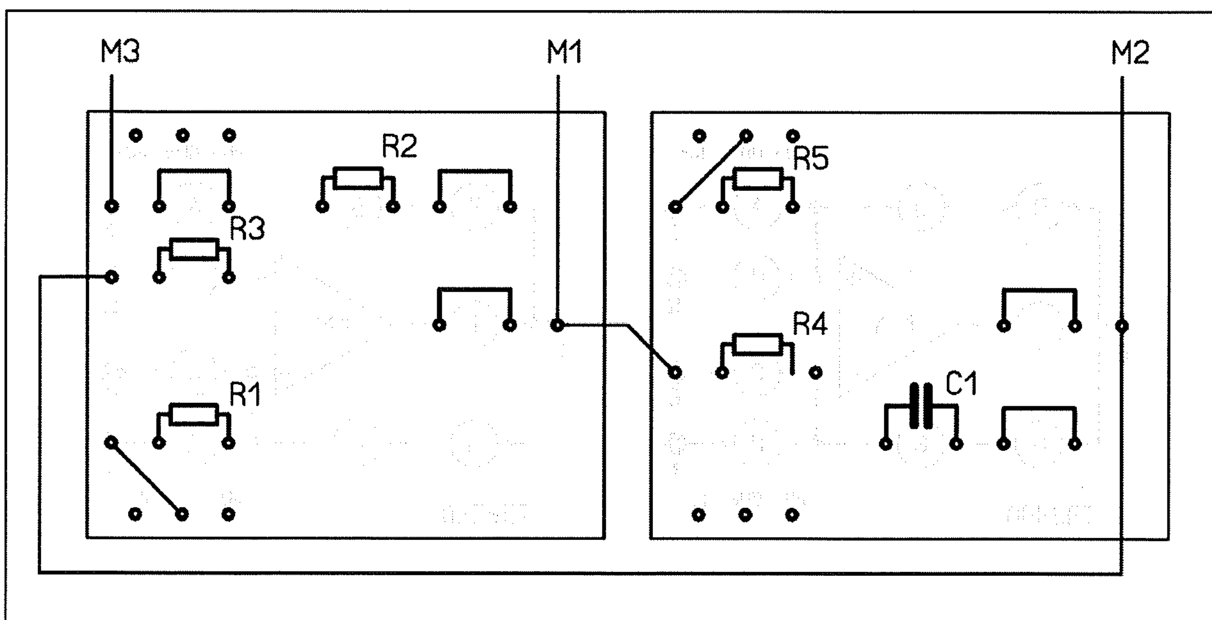
LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.8
Hoofdstuk 6/6.7



97.13 De op-amp als functiegenerator



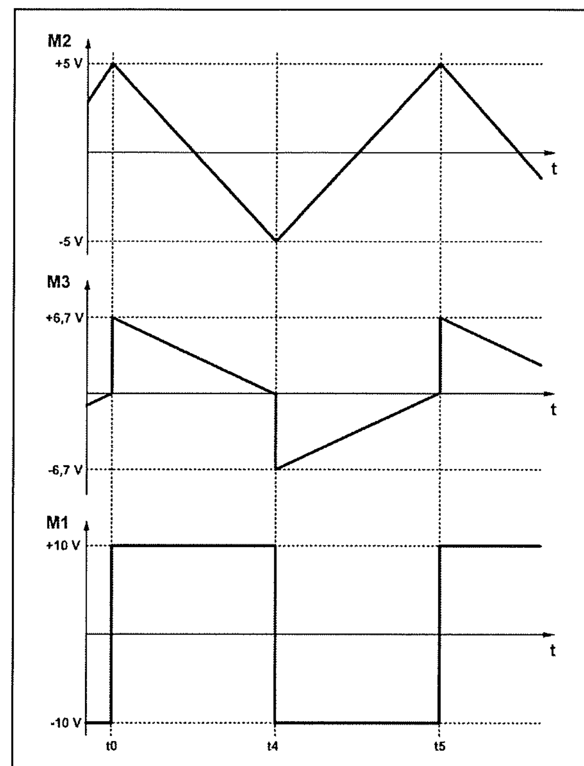
Figuur 3/97.13-1: Het basisschema van een functiegenerator.



Figuur 3/97.13-2: De basisschakeling van een functiegenerator op twee experimenteerprinten.

97.13 De op-amp als functiegenerator

Belangrijk voor het begrijpen van de werking is dat de positieve ingang van IC1 is verbonden met het knooppunt van twee weerstanden R2 en R3. Weerstand R2 gaat naar de uitgang van de comparator, weerstand R3 naar de uitgang van de integrator. Beide weerstanden vormen een spanningsdeler en het zal duidelijk zijn dat de spanning op de positieve ingang van de comparator zowel door de uitgangsspanning van de comparator als door de uitgangsspanning van de integrator wordt bepaald.
Bovendien moeten we voor ogen houden dat de negatieve ingang van de comparator via R1 is verbonden met de massa. Hieruit kunnen we afleiden dat de uitgang van de comparator omschakelt van de ene naar de andere voedingsspanning op het moment dat de spanning op de positieve ingang (dus het knooppunt R2 - R3) gelijk wordt aan nul volt.
Laat ons aannemen dat de spanning op de uitgang van de comparator op een bepaald moment t0 gelijk is aan +10 V. Laat ons verder aannemen (waarom volgt later) dat de uitgang van de integrator zich op hetzelfde moment op een spanning van +5 V bevindt. We kunnen nu de spanning op de positieve ingang van de comparator berekenen. We weten immers de waarden van beide weerstanden R2 en R3, want R2 is gelijk aan tweemaal de waarde van R3. Bovendien weten we dat over de serieschakeling van beide weerstanden een spanning staat van 5 V. Punt A staat immers op +10 V en punt B is, zo hebben we verondersteld, +5 V. Het spanningsverschil van 5 V staat over in totaal 15 kΩ (we ronden de praktische waarde van R3 maar even af naar 5 kΩ). Nu weten we uit de wet van Ohm, dat de spanningen over in serie geschakelde weerstanden zich verhouden zoals de deelweerstanden.



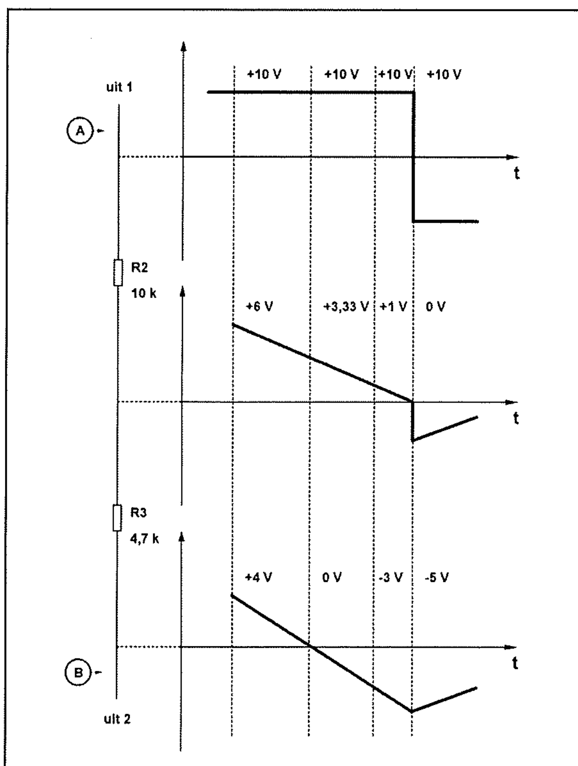
Figuur 3/97.13-3: Het verloop van de spanningen op de belangrijkste punten van de schakeling.

Met andere woorden: over R2 valt dubbel zoveel spanning dan over R3. Even nadenken leert dat de totale spanning van 5 V zich dus verdeelt in ongeveer 3,4 V over R2 en ongeveer 1,7 V over R3. De positieve ingang van de comparator staat bijgevolg op een spanning van +6,7 V, de som van de +5 V op punt B en de 1,7 V spanningsval over R3.

Wat gebeurt er verder?
De ingang van de integrator wordt gestuurd met een positieve spanning van +10 V. Uit een van de vorige experimenten weten we dat de schakeling hierop reageert door het lineair laten dalen van

97.13 De op-amp als functiegenerator

de uitgangsspanning. Nu zijn zowel R4 als C1 vrij groot, die daling gaat dus erg langzaam en we kunnen het proces op onze meetinstrumenten volgen. Het dalen van de uitgangsspanning heeft tot gevolg dat ook de spanning op de positieve ingang van IC1 gaat dalen. In figuur 3/97.13-4 hebben we dat getekend. Als de uitgangsspanning van de integrator gedaald is tot - 3 V, staat er nog een positieve spanning van 1 V op de comparator. Deze spanning nadert dus wel langzaam maar zeker het omschakelpunt van de comparator, namelijk nul volt (negatieve ingang comparator is immers nul volt). We kunnen dan ook precies bepalen, wanneer de comparator zal omklappen.



Figuur 3/97.13-4: Gedetailleerde grafische verklaring van het spanningsverloop op de positieve ingang van de comparator.

Als de uitgang van de integrator is gedaald tot -5 V, verdeelt de totale spanning over R2 - R3 zich zo dat het knooppunt op nul volt staat.
Op dit tijdstip t4 slaat de comparator om, de uitgangsspanning wordt gelijk aan de negatieve voedingsspanning. De spanningsverdeling over R2 en R3 wijzigt zich dan drastisch. Punt A springt naar -10 V, punt B staat op -5 V. Over beide weerstanden staat 5 V, het knooppunt komt op een spanning van -6,5 V. De uitgangsspanning van de integrator gaat nu stijgen. Deze schakeling wordt nu immers uit een negatieve spanning van -10 V gevoed.
Een en ander heeft tot gevolg dat de spanning op de positieve ingang van de comparator nu weer gaat stijgen. Op tijdstip t5 is de uitgang van de integrator gestegen tot +5 V, het knooppunt van R2 en R3 komt op massapotentiaal, de comparator slaat weer om.
De functiegenerator heeft één cyclus doorlopen, de volgende cyclus start.

Conclusie

Het samenwerken van integrator en comparator levert een schakeling op die continu een driehoek en een blok opwekt. De frequentie van die signalen wordt bepaald door de waarde van R4 en C1. Hoe kleiner beide onderdelen, hoe sneller de condensator zich zal op- en ontladen en hoe hoger de frequentie van de uitgangssignalen.
In de praktijk schakelt men C1 met een draaischakelaar om naar waarden die 10, 100 of 1.000 maal groter of kleiner zijn. Dat is de bereikenschakelaar van de frequentie. Door R4 als potentiometer met schaalverdeling uit te voeren kan men in ieder bereik de frequentie een factor 10 variëren.

97.13 De op-amp als functiegenerator

Opmerking

De door ons opgebouwde schakeling zit tegenwoordig in één IC'tje. Het IC XR2207, bijvoorbeeld, gebruikt in de functiegenerator van de analoge trainer, is zo'n samengesteld IC.

Vervolgens...

In het volgende experiment gaan we verklaren hoe deze schakeling zó uitgebreid kan worden, dat ze in staat is ook nog eens sinusvormige spanningen op te wekken.

97.13 De op-amp als functiegenerator

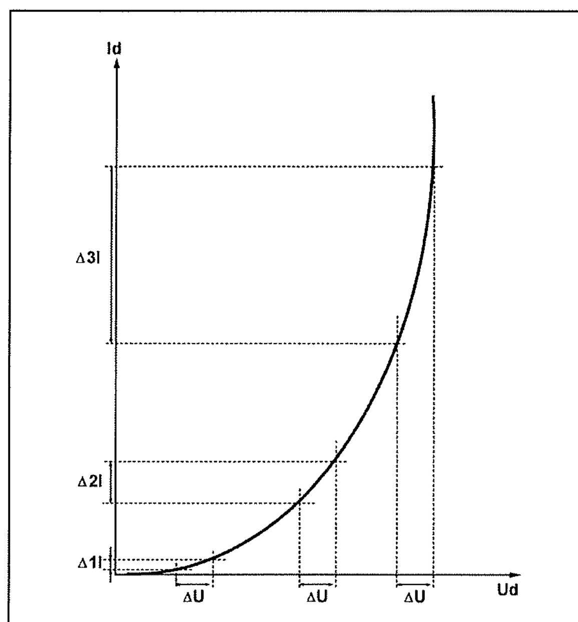
3/97.14

De op-amp met niet-lineaire terugkoppeling

Niet-lineaire terugkoppeling, de basis van sinus uitbreiding

Tot nu toe hebben we bijna steeds een terugkoppeling tussen uit- en ingangen van de op-amp aangebracht, opgebouwd uit één weerstand. Zo'n terugkoppeling noemt men lineair, omdat hij dezelfde terugkoppelingsfactor oplevert voor gelijk welke spanningsgrootte aan in- of uitgang. Een weerstand van 1 kΩ is immers een weerstand van 1 kΩ. Nu bestaan er echter ook niet-lineaire onderdelen. Dat zijn componenten waarvan de weerstandswaarde afhankelijk is van de grootte van de spanning over het onderdeel, of van de grootte van de stroom door het onderdeel.

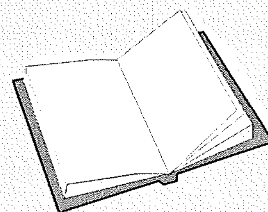
De gewone siliciumdiode, zoals de 1N914 of 1N4148, is een typisch voorbeeld van een niet-lineair element. Dat kunnen we aantonen aan de hand van de stroom/spanning-karakteristiek, getekend in figuur 3/97.14-1. Deze grafiek geeft het verband tussen de spanning over de diode en de stroom die als gevolg van het aanleggen van deze spanning door het onderdeel gaat lopen. Dit verband is niet lineair. Als de spanning klein is (ongeveer 0,1 V) dan loopt er een zeer lage stroom door de diode. Als we de spanning verdubbelen, dan stellen we vast dat de stroom meer dan verdubbelt.



Figuur 3/97.14-1: Het verband tussen de spanning over en de stroom door een diode is niet-lineair.

LEES OOK:

Hoofdstuk 3/12.4
Hoofdstuk 3/12.8
Hoofdstuk 6/6.7



97.14 De op-amp met niet-lineaire terugkoppeling

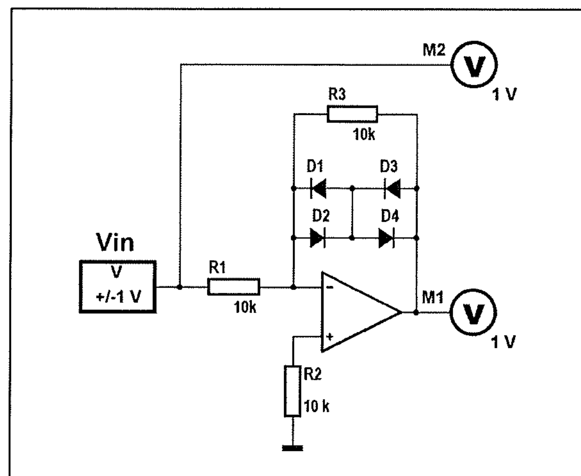
Zouden we een spanning van 1 V over de diode zetten, dan zouden we vaststellen dat de stroom zeker een factor 1.000 groter zou worden, waardoor het onderdeel dadelijk zou smelten. Wat betekent dat niet lineaire verband? Uit de samenhang tussen spanning en stroom kunnen we de inwendige weerstand van het onderdeel afleiden. De weerstand wordt immers door de wet van Ohm gegeven als het resultaat van het delen van de spanning door de stroom. In figuur 3/97.14-1 hebben we op de spanning-as op drie plaatsen een gelijk spanningsgebied ΔV afgemeten. We kunnen dan op de stroom-as aflezen hoeveel de stroom door de diode varieert als we de spanning met Δ V laten stijgen. Hieruit blijkt dat de stroomvariatie Δ1 veel kleiner is dan Δ2. Uit de wet van Ohm volgt dat de inwendige weerstand van de diode wordt gegeven door:
$Ri = \Delta V / \Delta I$
Een kleine stroomvariatie voor een bepaalde spanningsvariatie ΔV komt dus overeen met een hoge inwendige weerstand. Een grote stroomvariatie voor dezelfde spanningsvariatie ΔV komt overeen met een lage inwendige weerstand.

Conclusie

Als we de spanning over een diode laten stijgen van 0 V tot 0,6 V, varieert de inwendige weerstand tussen bijna oneindig tot bijna nul. Van deze eigenschap kunnen we gebruik maken voor het opbouwen van een niet-lineaire terugkoppeling bij een op-amp.

Het schema

Het schema is getekend in figuur 3/97.14-2. De ingangsspanning wordt aangeboden aan de inverterende ingang. Tussen deze ingang en de uitgang is een netwerkje opgenomen, opgebouwd uit een vaste weerstand R3 en vier dioden. Het schema voldoet aan de basisopzet van een inverterende versterker.



Figuur 3/97.14-2: Het schema van een op-amp met niet-lineaire terugkoppeling.

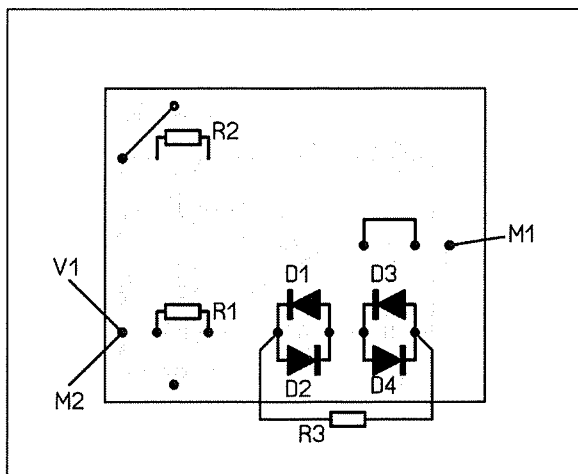
De praktijk

Dit experiment kan volgens figuur 3/97.14-3 opgebouwd worden op de proefprint. Op de ingang wordt een van de spanningsbronnen aangesloten, geschakeld op het ±1 V bereik. De ingang en de uitgang gaan naar spanningsmeters, geschakeld op het ±1 V bereik.

Hoe de uitgang reageert op de ingang

We kunnen nu het verband tussen in- en uitgangsspanning opmeten en in een tabel verwerken, zie figuur 3/97.14-4. We laten de ingangsspanning in stappen van 0,1 V stijgen en meten telkens de uitgangsspanning. De resultaten van deze metingen kunnen we in een grafiek uittekenen, volgens figuur 3/97.14-5. De horizontale as geeft de ingangsspanning, de verticale as de uitgangsspanning.

97.14 De op-amp met niet-lineaire terugkoppeling

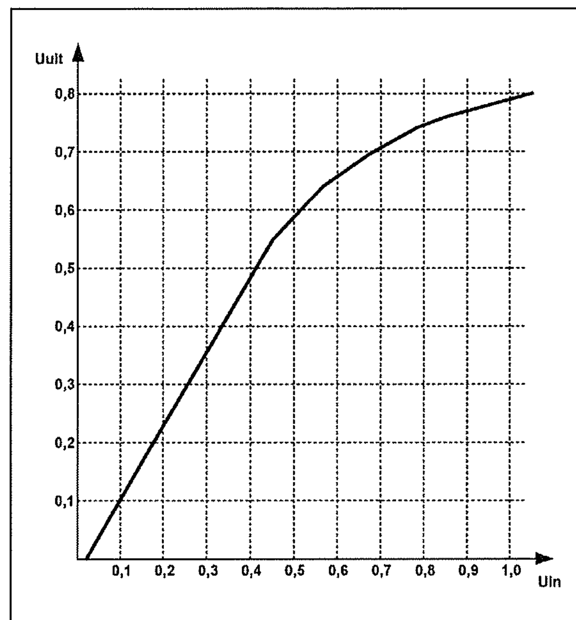


Figuur 3/97.14-3: De schakeling op onze experimenteerprint.

Vin	Vuit
0 V	0 V
+0,1 V	-0,1 V
+0,2 V	-0,2 V
+0,3 V	-0,3 V
+0,4 V	-0,4 V
+0,5 V	-0,48 V
+0,6 V	-0,58 V
+0,7 V	-0,65 V
+0,8 V	-0,70 V
+0,9 V	-0,72 V
+1,0 V	-0.75 V

Figuur 3/97.14-4: Het verband tussen in- en uitgangsspanning, weergegeven op een numerieke manier.

Dit verband is, zoals te verwachten was, niet lineair. Voor kleine ingangsspanningen stijgt de uitgangsspanning lineair. Een verdubbeling van V_{in} heeft een verdubbeling van V_{uit} tot gevolg. Voor ingangsspanningen boven 0,6 V gaat dat echter niet meer op. De uitgangsspanning stijgt dan minder snel voor gelijke spanningsstijgingen aan de ingang.



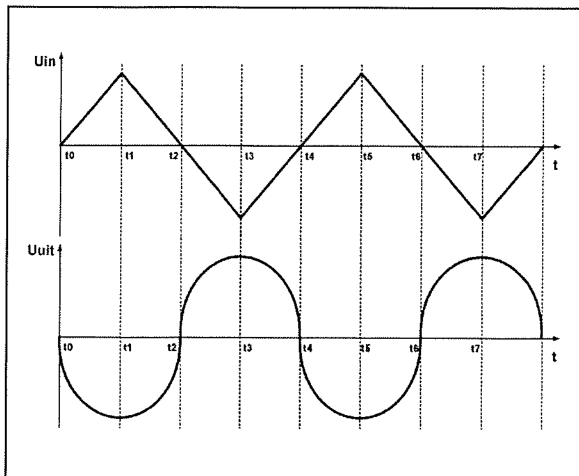
Figuur 3/97.14-5: De resultaten van figuur 3/97.14-4, maar nu in een grafiek weergegeven.

Een pseudo-sinus

Als we onze verbeelding even aan het werk zetten, doet het grafiekje van figuur 3/97.14-5 ons ergens aan denken. Inderdaad, een sinusspanning verloopt ongeveer volgens hetzelfde patroon. Figuur 3/97.14-5 geeft niets anders weer dan het verloop van één kwart van de periode van een sinus.

We hebben dus een zeer eenvoudige driehoek-naar-sinus-omvormer gebouwd die we in principe achter de functiegenerator uit hoofdstuk 3/97.13 kunnen schakelen. Het volstaat op de ingang van de omvormer een driehoek aan te sluiten met een top-tot-top waarde van 2 V (zie figuur 3/97.14-6) om op de uitgang een sinus te krijgen met een top-tot-top waarde van 1,5 V.

97.14 De op-amp met niet-lineaire terugkoppeling



Figuur 3/97.14-6: Een driehoek op de ingang levert een "sinus" aan de uitgang.

Hoe werkt deze schakeling?

Simpel: voor kleine ingangsspanningen zijn de dioden in de terugkoppeling niet actief. De versterking van de schakeling wordt bepaald door de verhouding van R1 tot R3. Beide weerstanden zijn even groot, de versterkingsfactor is 1.

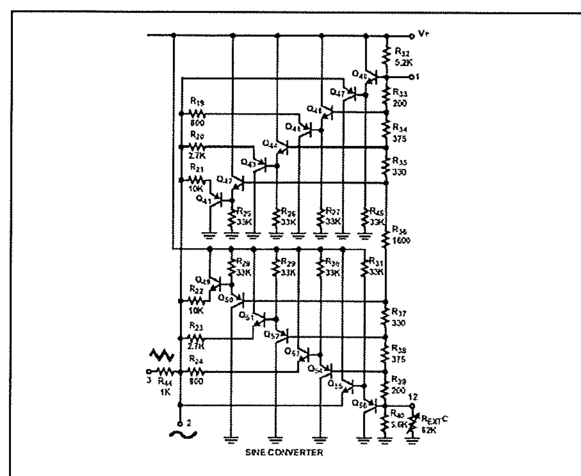
Als de ingangsspanning stijgt wordt de versterking van de schakeling niet meer alleen bepaald door de weerstandsverhouding, maar ook door de dalende weerstand van de dioden. De weerstand in de terugkoppeling daalt, de versterking wordt kleiner, de stijging van de uitgangsspanning wordt kleiner. De uitgangsspanning wordt dus "afgetopt", met als gevolg dat de driehoek wordt omgezet in iets dat op een sinus lijkt.

Eenvoudig, maar met beperkingen

In de praktijk kleven er nogal wat bezwaren aan deze simpele driehoek-naar-sinus-omzetter. Het belangrijkste bezwaar is de relatief hoge vervorming. De schakeling van figuur 3/97.14-2 levert een sinus met minimaal 2 % vervorming en dat is veel te veel om in de praktijk bruikbaar te zijn. Een tweede bezwaar is dat de goede werking van de schakeling volledig afhankelijk is van de grootte van de driehoeksspanning op de ingang. Zou deze iets groter of iets kleiner worden, dan werkt de omzetter of niet meer, of gaat de sinusvervorming erg hoog worden.

Vandaar dat men in de praktijk veel ingewikkelder schakelingen gebruikt, die echter wel op dit principe berusten. In plaats van één terugkoppeltak met vier dioden bouwt men dan een heel netwerk op met weerstanden en soms wel tientallen dioden, die voor een zeer nauwkeurige omzetting van driehoek in sinus zorgen. Met deze schakelingen kan men sinussen met een vervorming van enige tienden procent opwekken.

Om u een indruk te geven van de complexiteit van dergelijke schakelingen hebben wij de driehoek-naar-sinus omzetter in de ICL8038, een functiegenerator-IC van Intersil, in figuur 3/97.14-7 voorgesteld.



Figuur 3/97.14-7: In het IC ICL8038 wordt deze schakeling toegepast voor het omzetten van de driehoek in een sinus.

97.14 De op-amp met niet-lineaire terugkoppeling

De combinatie van weerstanden en dioden is nu vervangen door een ingewikkeld netwerk van weerstanden en transistoren, dat echter dezelfde functie vervult.

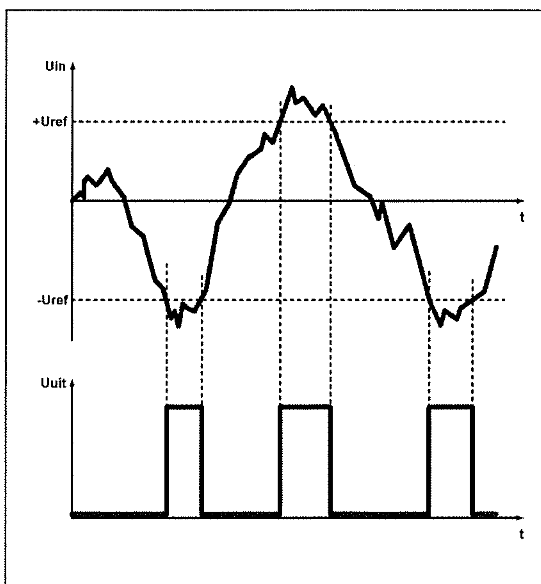
Naarmate de driehoekvormige spanning aan de ingang stijgt, gaan steeds meer transistoren geleiden, waardoor de versterking van de schakeling afneemt en de driehoek vrij nauwkeurig in een sinus wordt omgezet.

97.14 De op-amp met niet-lineaire terugkoppeling

3/97.15

De op-amp als vensterdiscriminator

De vensterdiscriminator, een dubbele comparator
Met de comparatorschakeling uit hoofdstuk 3/97.11 kunnen we een spanning vergelijken met één referentie en een alarmsignaal opwekken als de spanning de drempel overschrijdt. Vaak hebben we echter behoefte aan een schakeling die in staat is te controleren of een signaal binnen twee grenzen blijft.
Kijk maar naar figuur 3/97.15-1. Een variërende spanning U_{in} wordt vergeleken met twee referenties $+U_{ref}$ en $-U_{ref}$.

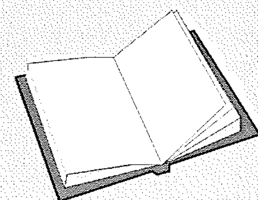


Figuur 3/97.15-1: De werking van een vensterdiscriminator.

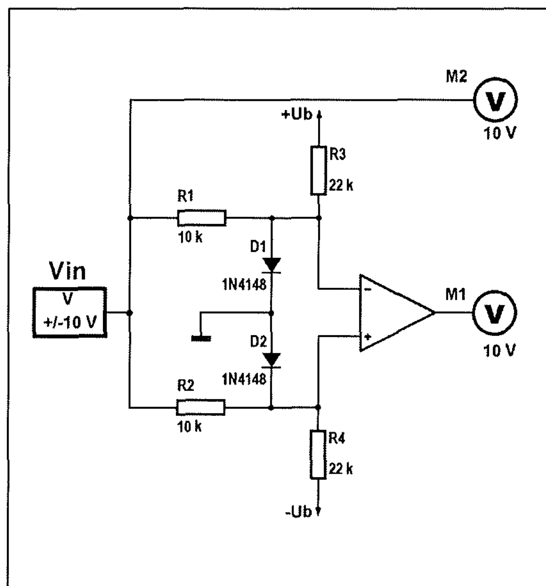
Als de spanning groter wordt dan de ene referentie of kleiner dan de andere, dan moet een uitgangssignaal worden opgewekt.
Zo'n schakeling noemt men een vensterdiscriminator. Er zijn diverse mogelijkheden om zo'n schakeling te realiseren. De meeste maken gebruik van twee of drie operationele versterkers. Er bestaat echter een niet zo bekende schakeling, die genoegen neemt met slechts één op-amp en deze schakeling gaan we in dit experiment toelichten.

Het schema
Het schema is getekend in figuur 3/97.15-2. De te vergelijken ingangsspanning wordt nu aan beide ingangen van de op-amp aangeboden via de weerstanden R1 en R2. De beide ingangen worden door middel van dioden en

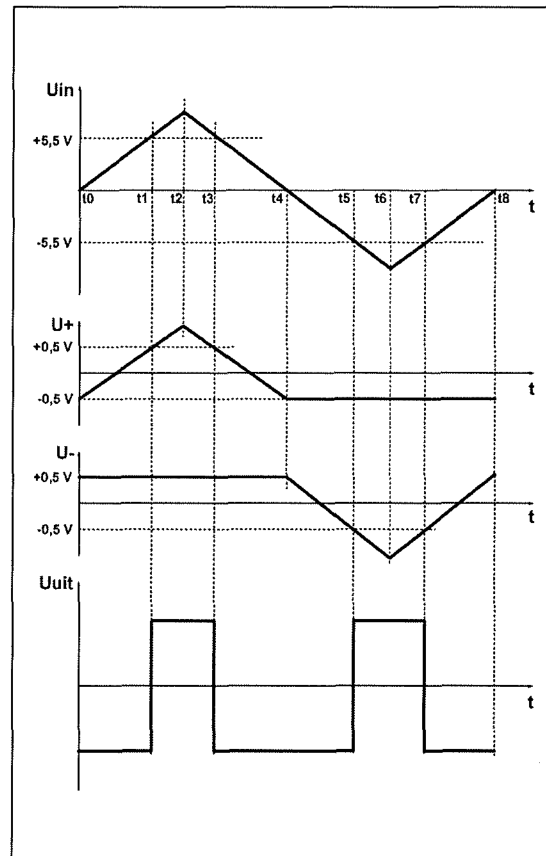
LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.3



weerstanden met de voedingsspanningen verbonden en ingesteld op kleine positieve en negatieve spanningen. Over de dioden vallen spanningen van 0,5 V. De negatieve ingang wordt ingesteld op een positieve spanning, de positieve ingang op een negatieve spanning.



Figuur 3/97.15-2: Het principeschema van een vensterdiscriminator.



Figuur 3/97.15-3: Grafische verklaring van de werking van de schakeling.

Grafische verklaring

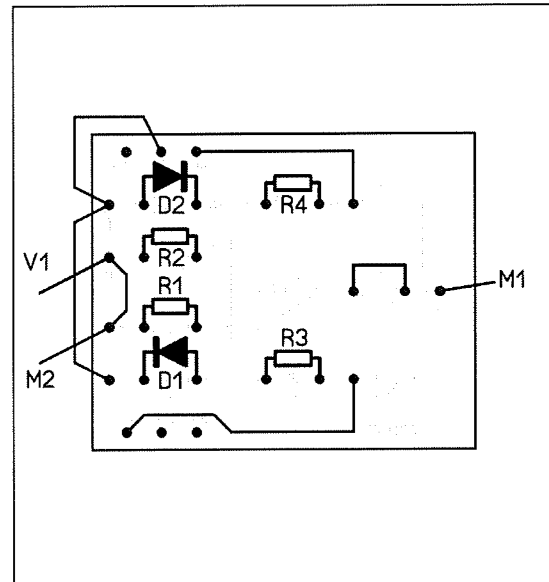
Figuur 3/97.15-3 geeft het verloop van de spanningen weer. Eerste voorbeeld. De ingangsspanning is nul volt. De uitgang van de comparator zal dan negatief zijn. De inverterende ingang van de op-amp is immers positiever dan de niet-inverterende ingang en dit spanningsverschil wordt door de op-amp tienduizenden keren versterkt. Tweede voorbeeld. We laten de ingangsspanning langzaam stijgen. De ingangsspanning is door middel van twee spanningsdelers aangesloten op de op-amp. De stijgende spanning heeft geen invloed op de negatieve ingang.

De geleidende diode D1 zorgt er immers voor dat de spanning constant blijft op +0,5 V. Anders zit dit bij de positieve ingang. Deze staat ingesteld op -0,5 V. Het stijgen van de ingangsspanning heeft tot gevolg dat er een stroom gaat lopen door de serieschakeling van R2 en R4, waardoor de spanning op het knooppunt langzaam toeneemt. Bij een bepaalde waarde van V_{in} wordt de spanning op de positieve ingang gelijk aan +0,5 V. De spanning op deze ingang wordt even later groter dan de diodespanning op de negatieve ingang, de comparator klapt om. De uitgang wordt positief. De grootte van de ingangsspanning, waarbij dit

97.15 De op-amp als vensterdiscriminator

omklappen gebeurt, wordt bepaald door de verhouding tussen R2 en R4. Ook de grootte van de voedingsspanning speelt een rol.
Conclusie. Als de ingangsspanning groter wordt dan +5,5 V zal de uitgang van de comparator omklappen van -Ub naar +Ub.

De praktijk
We kunnen een en ander op de trainer controleren! In figuur 3/97.15-4 is de componentenopstelling op de experimenteerprint getekend. Als we de spanning op de ingang laten dalen zal bij U_{in} kleiner dan 5,5 V de comparator weer omschakelen naar zijn starttoestand. Omdat de schakeling symmetrisch is opgebouwd, zal het duidelijk zijn dat hetzelfde verhaal geldt voor negatieve ingangsspanningen. Nu blijft de spanning op de positieve ingang constant op de -0,5 V diodespanning en gaat de spanning op de negatieve ingang langzaam dalen.
Als deze gelijk wordt aan - 0,5 V klapt de schakeling om, de uitgang wordt positief.



Figuur 3/97.15-4: De schakeling van de vensterdiscriminator op de trainer.

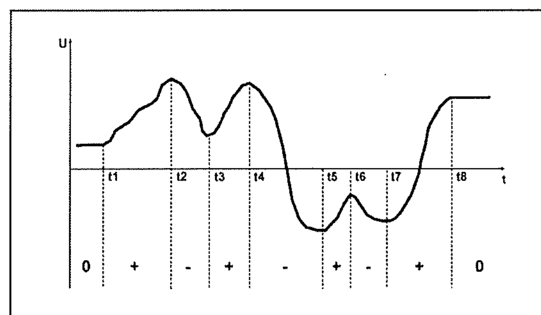
Toepassingen
Met deze schakeling kan men bij voorbeeld een zeer eenvoudige oversturingsindicatie ontwerpen voor een eindversterker of een mengpaneeltje. Als we de uitgang van de op-amp, via een transistor, naar een LED sturen en we berekenen de waarden van de vier weerstanden zo dat de schakeling omklapt als het signaal over de luidspreker groter wordt dan noodzakelijk voor het opwekken van een bepaald maximaal vermogen, dan zal het LED'je gaan branden als de versterker overstuurd wordt.

97.15 De op-amp als vensterdiscriminator

3/97.16

De op-amp als slope detector

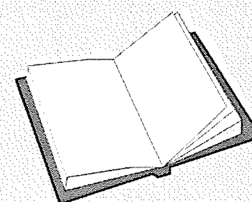
Inleiding
Het Engelse woordje "slope" staat voor "helling". In de elektronica wordt het woordje "slope" gebruikt om aan te geven hoe een signaal van de ene waarde naar een andere waarde gaat. Het signaal kan namelijk stijgen of dalen. In het eerste geval spreekt men van een positieve helling of slope, in het tweede geval van een negatieve helling of slope.
In figuur 3/97.16-1 is een vrij willekeurig verlopende spanning getekend, een spanning die we bijvoorbeeld kunnen verwachten aan de uitgang van de gelijkrichtschakeling van een dB-meter voor geluid. Vóór tijdstip t1 is de spanning in rust, de slope is nul. Tussen t1 en t2 stijgt het signaal naar een maximum, de slope is positief. Nadien daalt het signaal weer naar een bepaald minimum met uiteraard een negatieve slope. De overgang van een positieve naar een negatieve slope duidt dus steeds aan dat een signaal nét een maximum waarde heeft bereikt. De overgang van een negatieve naar een positieve slope zegt ons dat het signaal net uit een minimum komt.
Voor sommige schakelingen is het belangrijk te weten waar de minimale en maximale waarden optreden. Als we een systeem verzinnen dat ons meldt hoe de slope van het signaal verloopt, kunnen we uit deze informatie afleiden wanneer het signaal een minimum of een maximum doorloopt.



Figuur 3/97.16-1: Een willekeurig signaal stijgt met een positieve slope naar een maximum en daalt nadien met een negatieve slope naar een minimum.

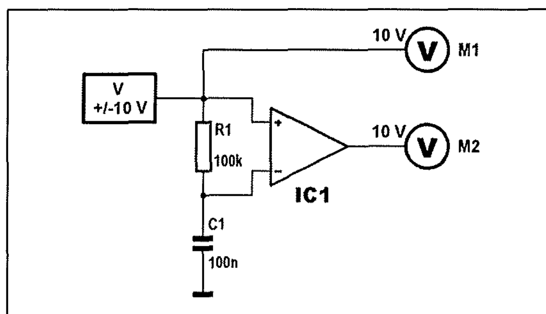
Slope detector met een op-amp
Met een op-amp kunnen we vrij eenvoudig een slope detector opbouwen. Het

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.5



97.16 De op-amp als slope detector

basisschema is getekend in figuur 3/97.16-2 en bestaat uit niets anders dan de in hoofdstuk 3/97.11 beschreven comparator, met één weerstandje en één condensator. Het ingangssignaal wordt aangeboden aan de positieve ingang. Tussen deze ingang en zijn inverterende soortgenoot staat een weerstand geschakeld. De negatieve ingang gaat bovendien via een condensator naar de massa.



Figuur 3/97.16-2: Het basisschema van een slope detector.

De schakeling op de trainer

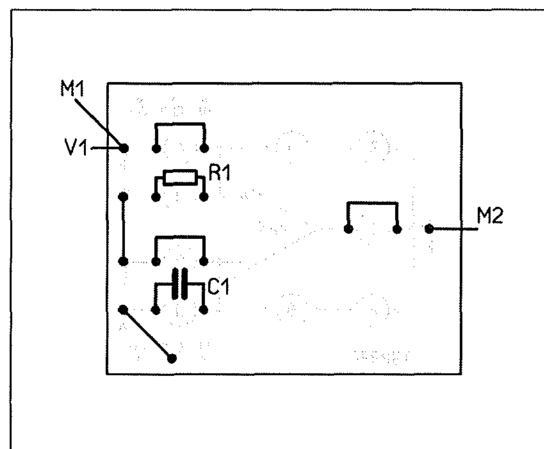
We kunnen dit experiment op onze universele analoge trainer opbouwen volgens figuur 3/97.16-3. De positieve ingang gaat naar een van de gelijkspanningspotentiometers, ingesteld op een willekeurige waarde tussen +5 V en -5 V. De uitgang van de schakeling zal ofwel maximaal positief, ofwel maximaal negatief zijn. We verdraaien de instelpotentiometer voor de offset-compensatie tot de uitgang net omklapt van plus naar min of van min naar plus. Hiermee hebben we de offset gecompenseerd en kunnen we het experiment starten.

De schakeling onderzoeken

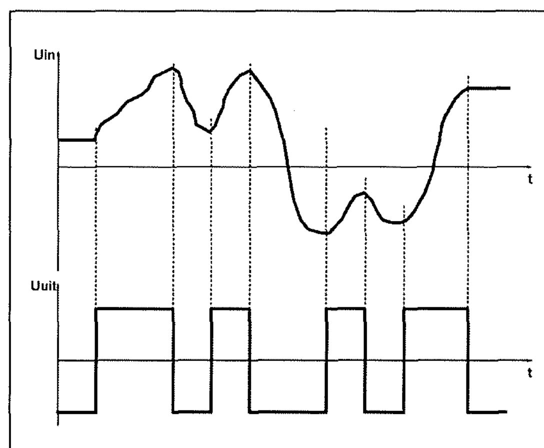
Verdraai langzaam de potentiometer van de trainer, zodat de spanning op de positieve ingang stijgt. U ziet de schakeling dadelijk reageren: de uitgang wordt positief. Laat nu de spanning weer dalen. De uitgang reageert prompt en wordt negatief.

Kortom, we hebben een slope detector gefabriceerd! Een positieve slope levert een positief uitgangssignaal op, een negatieve slope of nul slope een negatieve uitgang.

U kunt de werking van de schakeling grafisch voorstellen als getekend in figuur 3/97.16-4.



Figuur 3/97.16-3: De slope detector op onze experimenteerprint.

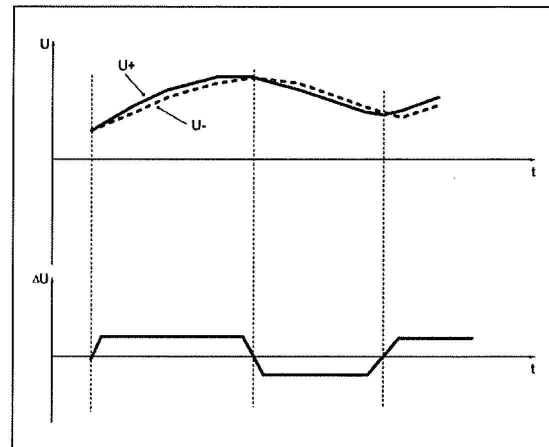


Figuur 3/97.16-4: De werking van de schakeling samengevat in een overzichtelijke grafiek.

97.16 De op-amp als slope detector

Verklaring van de werking

Hoe werkt deze schakeling? Vrij eenvoudig! De positieve ingang van de op-amp is rechtstreeks gekoppeld aan het ingangssignaal en volgt de variatie van dit signaal zonder enige vertraging.
De negatieve ingang is via weerstand R1 ook aangesloten aan de ingang, maar de condensator naar massa zal ervoor zorgen dat de spanning op de negatieve ingang steeds iets vertraagd is ten opzichte van de spanning op de positieve ingang. In figuur 3/97.16-5 hebben wij dat getekend. In de bovenste grafiek zijn de spanningen op de beide ingangen van de op-amp getekend, de positieve ingangsspanning als volle lijn, het signaal op de inverterende ingang gestippeld. Als U_{in} stijgt, dan zal er een stroom door R1 gaan vloeien die de condensator oplaadt. Zolang de ingangsspanning blijft stijgen zal er stroom door R1 blijven vloeien en zal de condensator zich opladen tot de stijgende ingangsspanning. Er is dus steeds een positief spanningsverschil tussen de positieve en de negatieve ingang. De op-amp is geschakeld als comparator en uit experiment 11 weet u inmiddels dat de op-amp op dat klein spanningsverschil reageert door het laten vastlopen van zijn uitgangsspanning tegen de positieve voedingsspanning.
Als de ingangsspanning gaat dalen, zal er een moment komen waarop de spanningen op beide ingangen aan elkaar gelijk worden. De comparator klapt om. Nadien zal de condensator gaan ontladen, maar ook nu zal er een klein spanningsverschil ontstaan tussen beide ingangen, zij het van inverse polariteit. De negatieve ingang is iets positiever dan de niet-inverterende ingang, de uitgang van de comparator blijft negatief.



Figuur 3/97.16-5: De werking van de schakeling berust op het kleine spanningsverschil Δt tussen beide ingangen, als gevolg van het vertraagd op- en ontladen van de condensator.

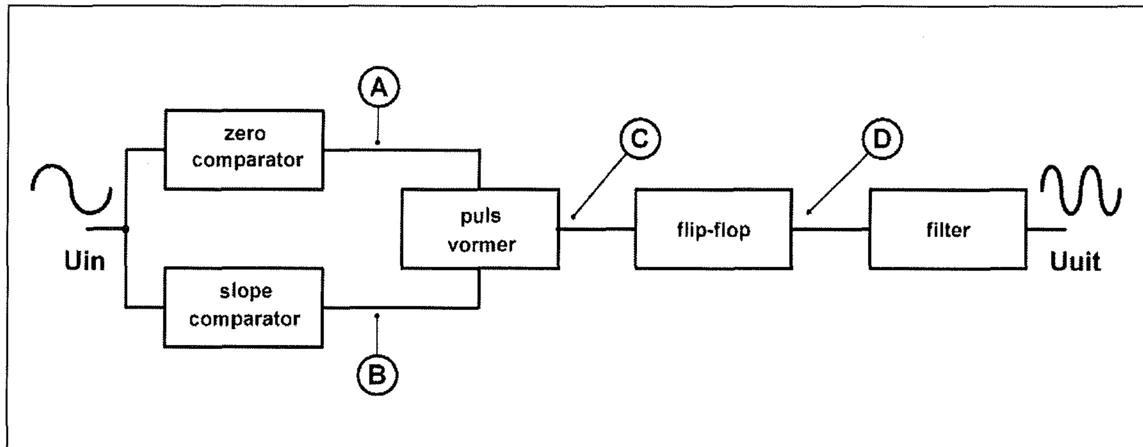
Beperkingen van de schakeling

Het zal duidelijk zijn dat de vertraging tussen positieve en negatieve ingang wordt bepaald door de grootte van R1 en C1. Hoe groter beide onderdelen, hoe trager de negatieve ingang de spanningsvariatie aan de ingang volgt.
Dit simpele feit geeft dadelijk de begrenzing aan van deze schakeling. De gekozen waarden van 100 kΩ en 100 nF zijn ideaal voor het volgen van de langzame spanningsvariaties op de trainer, maar zouden niet geschikt zijn als we de schakeling willen gebruiken bij zeer snelle ingangsspanningsvariaties.
Met andere woorden: de schakeling is frequentieselectief, voor iedere frequentieband moeten R1 en C1 andere waarden hebben.

Praktische toepassingen

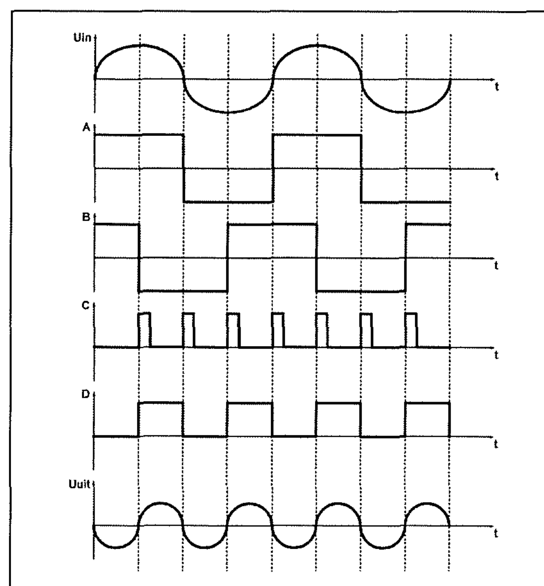
Een praktische toepassing van de slope detector is getekend in figuur 3/97.16-6.

97.16 De op-amp als slope detector



Figuur 3/97.16-6: De slope detector kan, binnen bepaalde grenzen, de frequentie van een ingangssignaal verdubbelen.

We willen de frequentie f_i van een bepaald sinusvormig signaal U_{in} verdubbelen. Bij muziekelektronica freaks zullen nu allerlei belletjes gaan rinkelen!
Het ingangssignaal leggen we aan de ingang van een slope detector (de waarden van R1 en C1 aangepast aan de frequentie van het ingangssignaal) en tegelijkertijd aan de ingang van een "normale" comparator volgens het experiment uit hoofdstuk 3/97-11. De uitgangsspanningen A en B van beide schakelingen kunnen we aflezen uit de grafieken van figuur 3/97.16-7.
Dat zijn twee vierkantsgolven, waarvan één een kwart periode verschoven is ten opzichte van de andere. In een pulsvormer wekken we naaldpulsjes op bij iedere overgang van plus naar min en omgekeerd van een van beide blokgolven. Met deze pulsjes sturen we een flip-flop. Aan de uitgang van deze schakeling (een tweedeler) verschijnt een blokgolf met de dubbele frequentie van het ingangssignaal. Uit deze blok kunnen we door een geschikte filtering (laagdoorlaat) weer een sinus afleiden, waarvan de frequentie het dubbele is van de frequentie van het ingangssignaal.
Niet de enige manier om de frequentie van een sinussignaal te verdubbelen, maar wel een zeer eenvoudige!



Figuur 3/97.16-7: De spanningsvormen in de schakeling van figuur 3/97.16-6 in functie van de tijd.

3/97.17

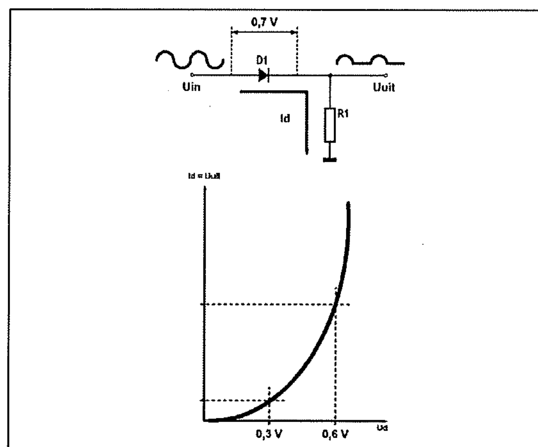
De op-amp als ideale diode

Inleiding

Tot nu toe hebben we ons bezig gehouden met toepassingen van de op-amp als versterker, signaalgenerator, vergelijker en detector. Een nieuwe serie experimenten gaat zich bezig houden met een belangrijk toepassingsgebied van moderne op-amp's: gelijkrichting en alles dat hiermee te maken heeft. Algemeen wil gelijkrichten zeggen: het omzetten van een wisselspanning in een gelijkspanning. Dat kan op verschillende manieren. Alle methoden hebben hun specifieke toepassingen, die we in de volgende experimenten onderzoeken.

De onvolmaakte diode

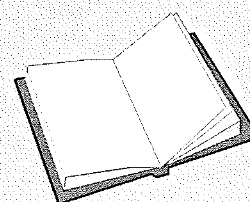
Wie gelijkrichten zegt, denkt aan een diode. Een diode is inderdaad een elektronisch component dat bij uitstek geschikt is voor het gelijkrichten van wisselspanningen. Een diode is een soort ventiel: als de kathode negatiever is dan de anode, dan geleidt het onderdeel. Als de spanningen omkeren, dan spert de diode. De diode is dus een soort schakelaar, die open of dicht is al naar gelang de polariteit van de spanning over de schakelaar. In figuur 3/97.17-1 is de meest simpele versie van een gelijkrichter getekend. Een gelijk te richten ingangssignaal U_{in} wordt aangeboden aan de anode van een diode.



Figuur 3/97.17-1: De diode als gelijkrichter, uitstekend bruikbaar voor het gelijkrichten van grote spanningen.

De diode vormt met de belastingsweerstand R1 een seriekring tussen de ingang

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.5

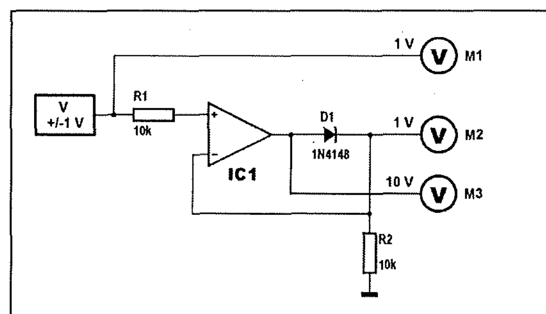


97.17 De op-amp als ideale diode

en de massa. Op het knooppunt van beide onderdelen wordt de uitgangsspanning afgetakt.
Als de ingangsspanning positief is geleidt het onderdeel (anode positief ten opzichte van kathode), er vloeit een stroom Id door de kring. Deze stroom bouwt over R1 een spanning op, de uitgangsspanning van de gelijkrichter. Als de ingangsspanning negatief wordt spert de diode. Er vloeit geen stroom, over R1 ontstaat geen spanning, de uitgangsspanning is nul. Alleen de positieve gedeelten van de ingang verschijnen op de uitgang.
Een ideaal systeem, zo te zien. Mispoes! De diode is alles behalve een ideale schakelaar. In hoofdstuk 3/97.14 hebben we de stroom/spanning-karakteristiek van een diode opgemeten en geconstateerd dat deze niet lineair is. Ook voor kleine positieve spanningen is er in feite van echt geleiden geen sprake. De diode heeft een zeer hoge inwendige weerstand en deze weerstand vormt met R1 een spanningsdeler. De Ri van de diode is veel groter dan R1, zodoende verschijnt er nauwelijks iets van de kleine positieve ingangsspanning aan de uitgang.
Als de ingangsspanning toeneemt gaat de Ri van de diode dalen. Eerst bij een spanning van ongeveer 1 V kan men spreken dat de uitgang recht evenredig is met de ingang. Bovendien valt er over een geleidende diode een spanning van ongeveer 0,7 V. Er kan dus nooit sprake zijn dat de ingangsspanning ongeschonden aan de uitgang wordt teruggevonden.
Voor gelijkricht toepassingen in voedingen is een diode ideaal. De gelijk te richten spanningen zijn groot, de spanningsval over de diode doet het rendement van de gelijkrichter weliswaar iets dalen, maar dat nemen we voor lief.
Anders wordt het als wij bijvoorbeeld de uitgangsspanning van een laagfrequent voorversterker (grootte orde 100 mV) willen gelijkrichten voor het sturen van een dB-meter of een ruisonderdrukker. Dan kunnen we met het schema van figuur 3/97.17-1 niets beginnen.

De op-amp als ideale diode

Dan maar een op-amp, duivel doet al, redder in alle nood, ingeschakeld! Het principiële schema van een ideale diode is getekend in figuur 3/97.17-2 en gaan we als dusdanig opbouwen op de trainer, zie figuur 3/97.17-3. Voor het eerst wordt de verbinding I op de trainer niet door een draadbruggetje opgevuld. Aan de ingang bieden we spanningen tussen +1 V en -1 V aan. Wij gaan meten wat we van deze ingangsspanning op de uitgang terugvinden.



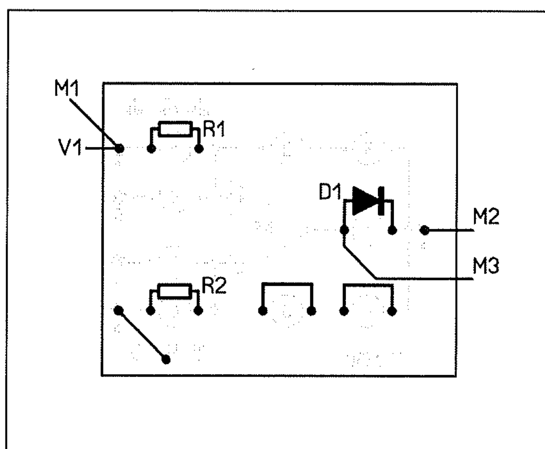
Figuur 3/97.17-2: De op-amp, geschakeld als ideale diode.

Meetresultaten

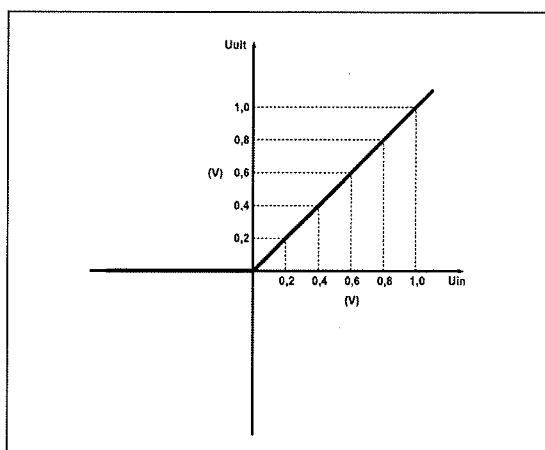
Figuur 3/97.17-4 geeft het resultaat. Als u de ingangsspanning in stappen van 0,1 V laat stijgen van -1 V tot +1 V, dan stelt u vast dat er voor negatieve ingangen geen uitgangsspanning verschijnt en voor positieve ingangsspanningen dezelfde grootte aan de uitgang wordt ge-

97.17 De op-amp als ideale diode

meten als op de ingang. De ideale diode is hiermee een feit! Geen uitgang voor negatieve ingangsspanningen, volledige doorkoppeling (tot op de millivolt nauwkeurig) voor positieve ingangen!



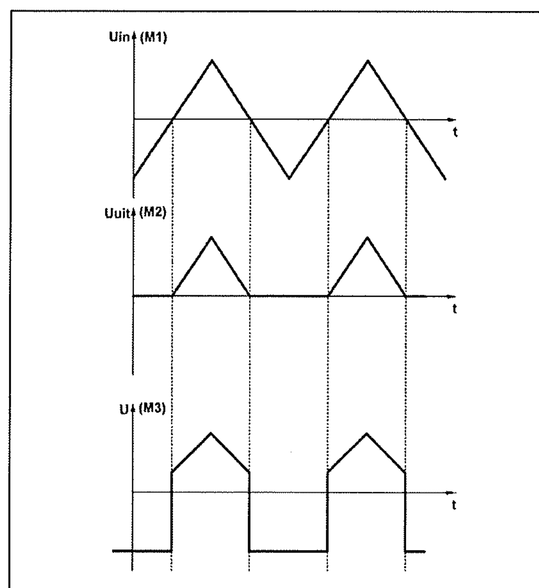
Figuur 3/97.17-3: Het schema van figuur 3/97.17-2 op uw experimenteerprint.



Figuur 3/97.17-4: Uit uw metingen kunt u deze karakteristiek afleiden.

Een raar verschijnsel

Ondertussen heeft u waarschijnlijk wél een raar verschijnsel vastgesteld. Op meter M3, die de uitgangsspanning van de op-amp meet, zien we opeens een spanningssprong naar -10 V optreden als de ingangsspanning negatief wordt, zie de grafieken van figuur 3/97.17-5. Hoe dat komt volgt uit de verklaring van de werking van de schakeling. Een positieve ingangsspanning zorgt voor een positieve spanning op de niet-inverterende ingang van de op-amp. De uitgang wordt dus ook positief, de anode van D1 wordt positief ten opzichte van de kathode, de diode geleidt. De negatieve ingang van de op-amp is verbonden met de kathode. De op-amp zal, zoals steeds, het spanningsverschil tussen beide ingangen wegregelen. Als de positieve ingang op +2 V staat zal ook de negatieve ingang dat potentiaal opzoeken. De uitgang volgt de ingang, de op-amp werkt in feite als buffer.



Figuur 3/97.17-5: De spanningen op de diverse punten van de schakeling grafisch voorgesteld.

Stel een negatieve ingangsspanning in. De positieve ingang wordt negatief, de uitgang van de op-amp volgt. De diode

gaat nu echter sperren. De uitgangsspanning van de schakeling blijft nul. Maar de niet-geleidende diode verbreekt de terugkoppeling tussen uitgang en inverterende ingang. De op-amp staat dan als comparator geschakeld. De kleine negatieve spanning op de positieve ingang wordt duizenden malen versterkt en de uitgang van de op-amp loopt vast tegen de negatieve voeding.

In frequentie beperkt

Deze forse spanningssprongen op de uitgang van de op-amp hebben tot gevolg dat het frequentiebereik van deze ideale diode nogal beperkt is.

Immers, een op-amp schakelt niet oneindig snel van -12 V naar +1 V, dat duurt een tijd. Als u dus een steeds hogere frequentie aan de ingang van deze schakeling zou aanleggen, dan zal bij een bepaalde frequentie de spanning op de uitgang van de op-amp volledig in de knoop geraken. De op-amp is dan niet meer in staat zijn uitgang in de beperkte tijd die ter beschikking staat van de hoge negatieve waarde terug te schakelen naar de kleine positieve waarde. De schakeling houdt het dan voor gezien en werkt niet meer.
In de volgende experimenten zullen wij echter schakelingen aan u voorstellen, die dit nadeel niet hebben.

3/97.18

De op-amp als dubbelfazige gelijkrichter

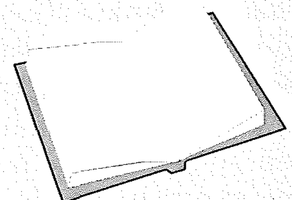
"Volle periode" gelijkrichter zou betere benaming zijn

De ideale diode uit het vorige experiment laat de positieve helften van de aangeboden wisselspanning door en spert de negatieve delen. Dat is een niet erg economische manier van werken en vandaar dat men gelijkrichters heeft ontworpen, die zowel de positieve als de negatieve helft van het ingangssignaal omzetten. Meestal noemt men dit soort gelijkrichters, welbekend uit voedingsschakelingen, "dubbelfazige" gelijkrichters. Een verkeerde naam, omdat het woord "faze" iets heel anders aanduidt dan een van de helften van een wisselspanningssignaal. Eigenlijk zouden we moeten praten over een "volle periode" gelijkrichter. Maar, de naam dubbelfazig is zó ingeburgerd, dat wij die ook maar blijven gebruiken.

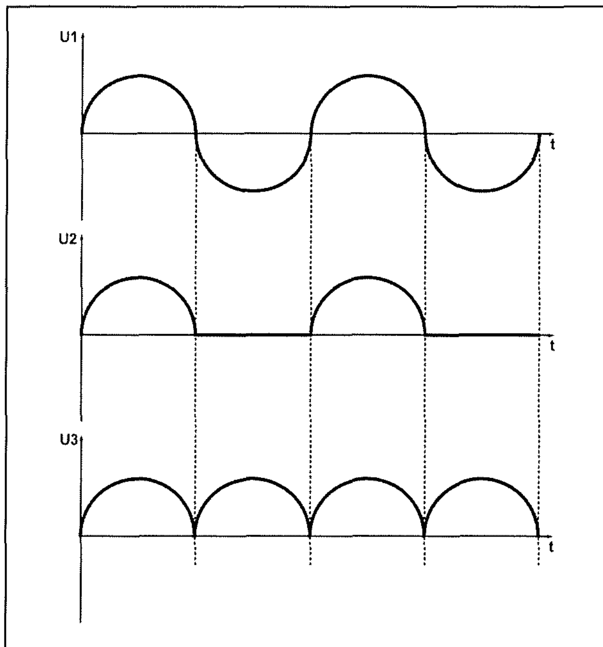
Zeer interessant voor kleine signalen

Ook bij het gelijkrichten van kleine signalen kunnen we beter beide helften van het ingangssignaal verwerken. Figuur 3/97.18-1 geeft het onderscheid tussen de uitgangsspanning van de ideale diode uit het vorige experiment (U2) en de uitgangsspanning van de in dit hoofdstuk behandelde schakeling (U3). Het principe van de schakeling is getekend in figuur 3/97.18-2. Een elektronische omschakelaar schakelt de uitgang ofwel rechtstreeks aan de ingangsspanning, ofwel aan de uitgang van een inverterende versterker met versterkingsfactor van exact -1. De schakeling klapt om bij de nuldoorgang van de ingangsspanning. Voor het positieve deel van het ingangssignaal staat de schakelaar in stand A. Het ingangssignaal verschijnt rechtstreeks aan de uitgang.
Bij een negatief ingangssignaal klapt de schakelaar om naar stand B en wordt de uitgang van de omkeerversterker verbonden met de uitgang. Deze heeft er voor gezorgd dat het negatieve ingangssignaal is omgezet in een even groot, maar positief variërend signaal (zie de bespreking van de omkeerversterker in hoofdstuk 3/97-3).

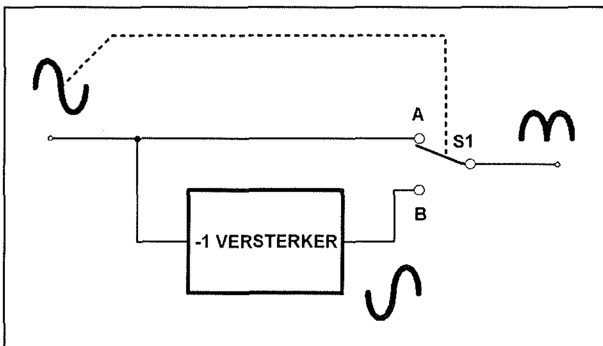
LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.5



97.18 De op-amp als dubbelfazige gelijkrichter



Figuur 3/97.18-1: Een vergelijking tussen de uitgangsspanning van een halve periode gelijkrichter en een volle periode gelijkrichter.



Figuur 3/97.18-2: Het principe van de werking van de schakeling.

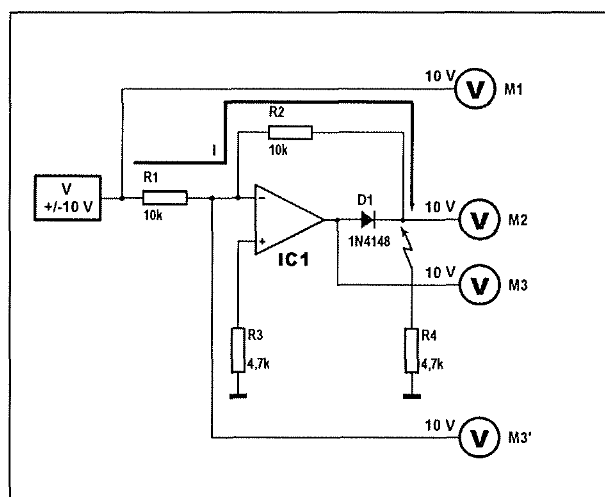
Het schema op uw experimenteerprint

Het praktisch schema is getekend in figuur 3/97.18-3. U herkent de basisopzet van een omkeerversterker: weerstand R1 tussen de ingang van de schakeling en de inverterende ingang van de op-amp, even grote weerstand tussen de uitgang en de genoemde ingang. Alleen staat er nu een extra diode tussen de op-amp uitgang en uitgang van de schakeling. Het zal duidelijk zijn dat deze diode dient als elektronisch omschakelaar, die ofwel de ingang rechtstreeks verbindt met de uitgang, ofwel de omkeerversterker tussenschakelt.

In figuur 3/97.18-4 is de noodzakelijke bedrading op uw experimenteerprint getekend. Ondertussen weet u natuurlijk hoe u de schakeling kunt testen: de ingangsspanning stapsgewijs instellen tussen bijvoorbeeld -5 V en +5 V, de resultaten op de drie meters aflezen en het geheel in een tabel en/of grafiek samenvatten.

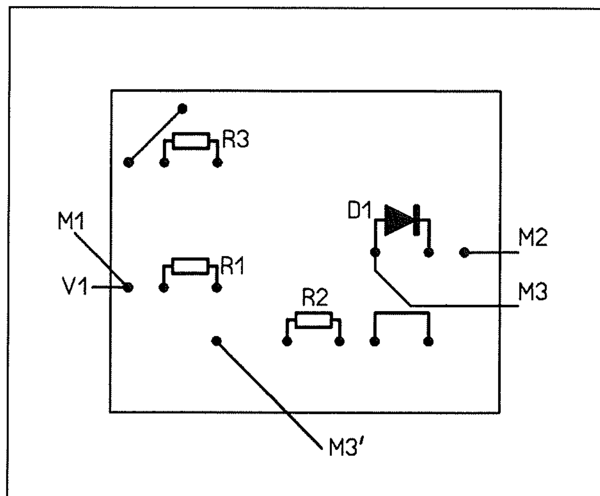
Even een opmerking

In de tekening van figuur 3/97.18-3 en ook in de grafieken van figuur 3/97.18-5 is een meter M3' opgevoerd. We hebben maar drie meters op onze trainer, vandaar dat het de bedoeling is bij het experimenteren meter M3 eerst met de uitgang van de op-amp te verbinden en nadien met de inverterende ingang en voor beide gevallen het spanningsverloop op te meten voor een en dezelfde ingangsspanningsvariatie.



Figuur 3/97.18-3: Het schema van de dubbelfazige gelijkrichter.

97.18 De op-amp als dubbelfazige gelijkrichter



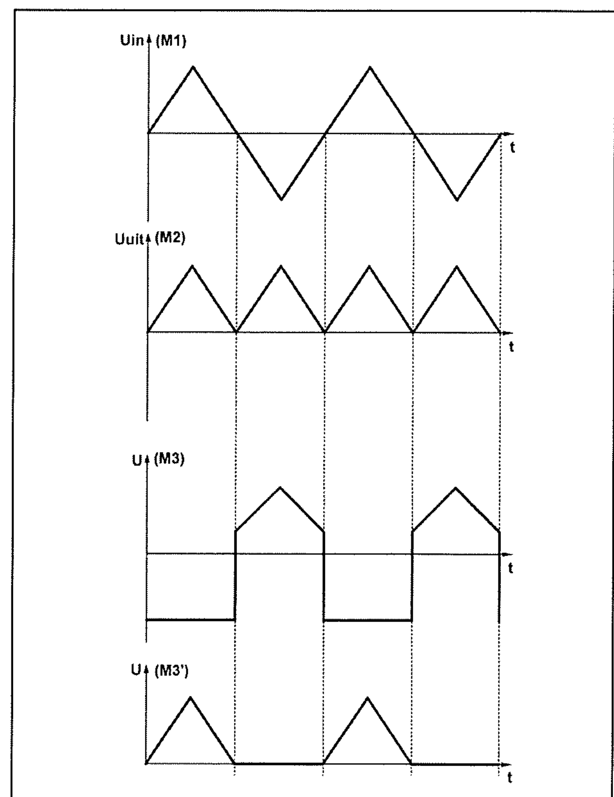
Figuur 3/97.18-4: Het schema op uw experimenteerprint.

De werking van de schakeling

De werking van de schakeling wordt besproken aan de hand van de grafieken van figuur 3/97.18-5. Stel dat we een positieve spanning aan de ingang leggen. Deze spanning gaat via R1 naar de inverterende ingang van de op-amp. De positieve ingang ligt aan massa, de op-amp zal het spanningsverschil tussen beide ingangen versterken. Kortom, de uitgang wordt negatief. Deze negatieve spanning kan echter nergens naar toe. De diode wordt gesperd (anode negatief) en de uitgang zal de uitgangsspanning van de op-amp niet overnemen. Een en ander heeft tot gevolg dat de op-amp in open-lus werkt, de uitgang wordt maximaal negatief. Bovendien dringt de positieve spanning op de ingang via weerstand R2 door naar de uitgang. De uitgang wordt positief.

Als we een negatieve spanning aanleggen aan de ingang van het systeem, dan zal de inverterende ingang negatief worden. De uitgang van de op-amp wordt bijgevolg positief en de diode gaat geleiden. De terugkoppelweerstand R2 zorgt er nu voor dat de spanning op de negatieve ingang gelijk wordt aan de spanning op de positieve ingang (nul volt). De schakeling werkt nu als gewone omkeerversterker, de uitgangsspanning is absoluut even groot als de ingangsspanning, maar met tegengestelde polariteit. Kortom, ook nu gaat de uitgang positief worden.

De volle periode gelijkrichting is een feit!



Figuur 3/97.18-5: De werking van de schakeling grafisch toegelicht.

Opmerkingen

Deze schakeling is erg eenvoudig en toch ziet u haar niet vaak in een praktische schakeling. Dat komt door een erg vervelende eigenschap. Zoals reeds geschreven zal de diode de op-amp uitschakelen voor positieve ingangsspanningen. Er staan dan twee weerstanden R1 en R2 tussen de in- en de uitgang geschakeld.

97.18 De op-amp als dubbelfazige gelijkrichter

Willen we een precisie-gelijkrichter opbouwen, dan mag er over deze weerstanden geen spanning vallen. Dan zal de uitgangsspanning kleiner zijn dan de ingangsspanning en dat is zeer zeker niet de bedoeling. De gelijkrichter wordt echter steeds belast door een volgende schakeling, die een bepaalde ingangsweerstand heeft. Als gevolg van deze belasting gaat er een stroom I door de twee weerstanden vloeien, met als gevolg dat een deel van de ingangsspanning als spanningsval over R1 en R2 blijft staan.

Dat kunt u simuleren door een weerstandje R4 aan te sluiten tussen uitgang en massa, zie figuur 3/97.18-3. U zult dan zien dat de uitgang varieert bij een positief ingangssignaal. Dan, immers, kan de uitgeschakelde op-amp met zijn zeer lage uitgangsweerstand de belasting niet opvangen.
Om deze reden zult u de dubbelfazige gelijkrichter steeds volgens een iets ingewikkelder schema terug vinden.

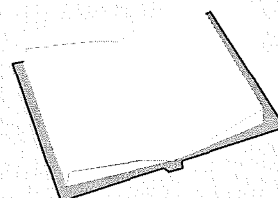
3/97.19

De op-amp als nauwkeurige gelijkrichter

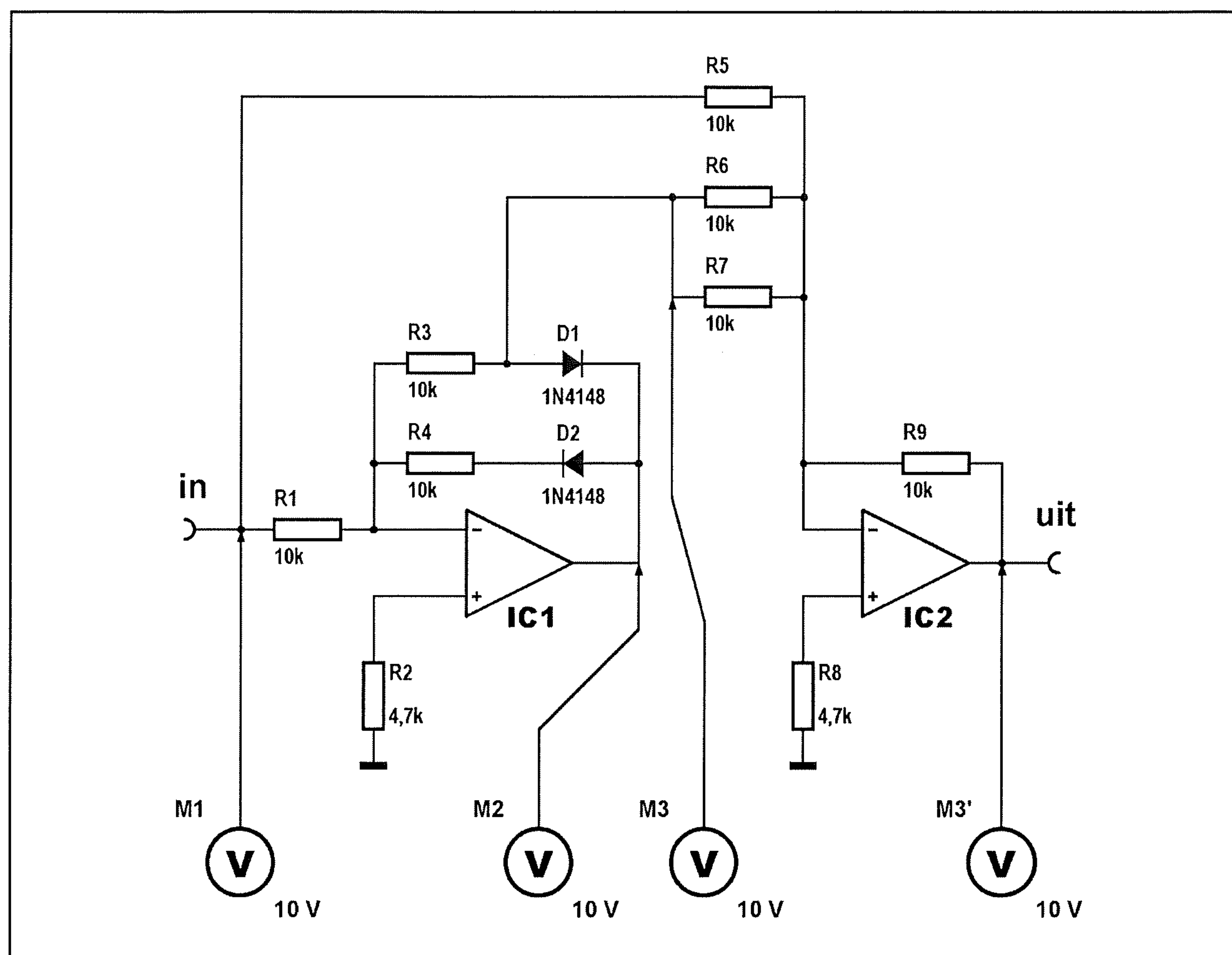
Inleiding
De "volle periode" gelijkrichter uit het vorige experiment heeft nog een ander nadeel, dat weliswaar niet op de trainer is te ontdekken, maar des te vervelender is bij praktische schakelingen. Zoals we gezien hebben, werkt de op-amp gedurende een halve periode van het ingangssignaal in open lus. De uitgangsspanning loopt dan vast tegen de voedingsspanning. Na de nuldoorgang van de ingangsspanning gaat de op-amp onmiddellijk het ingangssignaal volgen.
In dat "onmiddellijk" zit nu net de moeilijkheid. Niets in de elektronica gaat traagheidsloos, dus ook niet het omschakelen van een op-amp uitgang van een forse -10 V naar + 0,5 V. Dat kost een bepaalde tijd, bepaald door de eigenschappen van de gebruikte op-amp. Voor lage frequenties van het ingangssignaal is dat geen probleem. Het omschakelen neemt dan een verwaarloosbaar tijdsinterval in beslag, slechts enige procenten van de totale periodeduur. Stijgt de frequentie van het ingangssignaal, dan neemt het procentuele aandeel van het omschakelen van open lus naar gesloten lus in de totale duur van één periode toe en valt niet meer te verwaarlozen.
De gelijkrichter gaat niet meer goed werken. Vandaar dat men heeft gezocht naar een schakeling, waarbij de op-amp nooit in open lus werkt en die bovendien zonder beïnvloeding van de nauwkeurigheid kan worden belast. De in dit experiment behandelde volle periode gelijkrichter maakt gebruik van twee op-amp's en is een zeer nauwkeurige wissel- naar gelijkspanningsomzetter. Zo nauwkeurig, dat deze schakeling ook gebruikt kan worden in het gelijkrichterdeel van digitale universeelmeters, die de spanning aan de ingang meten met een nauwkeurigheid van enige tienden procent en dit over een breed frequentiegebied!

Het schema van de schakeling
Het schema van de schakeling is getekend in figuur 3/97.19-1. Rond op-amp IC1 herkent u voor een deel de vorige schakeling.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.5



97.19 De op-amp als nauwkeurige gelijkrichter



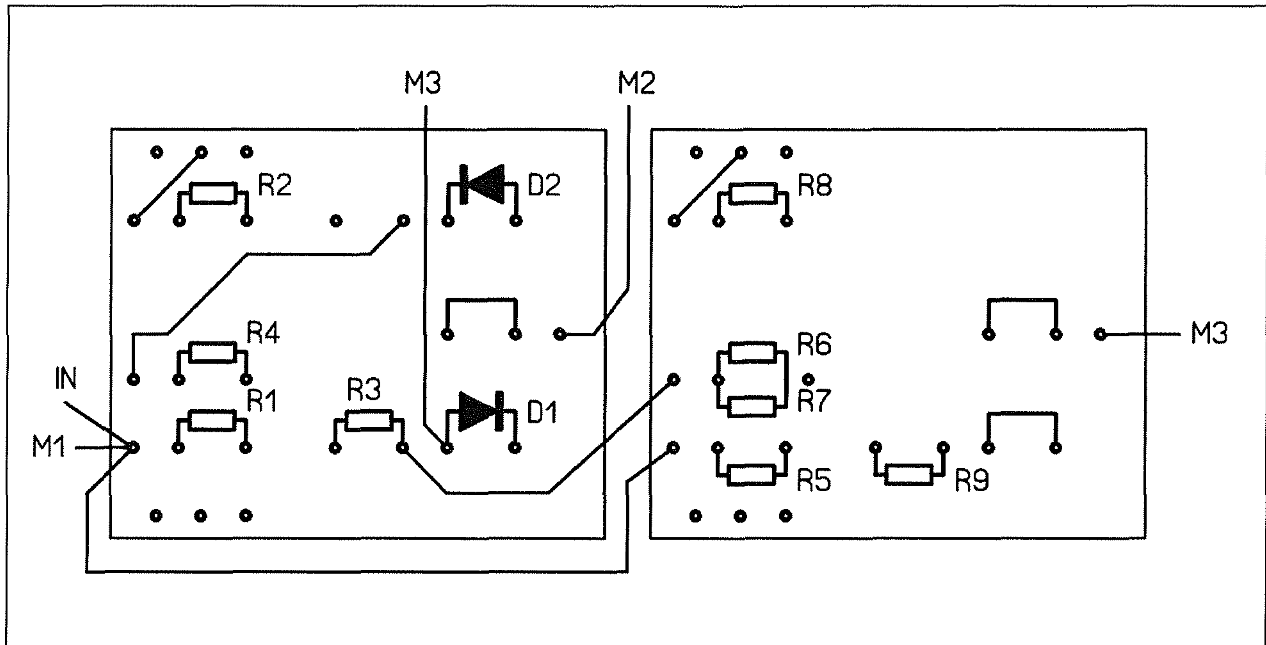
Figuur 3/97.19-1: Het schema van de nauwkeurige gelijkrichter rond twee op-amps.

R1, R3 en D1 vormen de reeds behandelde schakeling, die zorgt voor het omzetten van de positieve halve perioden in negatieve uitgangssignalen. Het in open lus werken van de op-amp wordt vermeden door het toevoegen van een extra terugkoppelkring R4 - D2. Als de ingangsspanning negatief wordt, dan zal D1 weliswaar gaan sperren, maar D2 gaat geleiden, waardoor er toch een terugkoppeling ontstaat tussen uit- en ingang van de op-amp.
De tweede op-amp IC2 is niets meer dan de reeds eerder behandelde inverterende menger. Deze telt de signalen op de punten M1 en M3 op. De weerstandsverhouding tussen R5, R6 parallel aan R7 en R9 zorgt voor een mooi gelijkgericht signaal aan de uitgang.

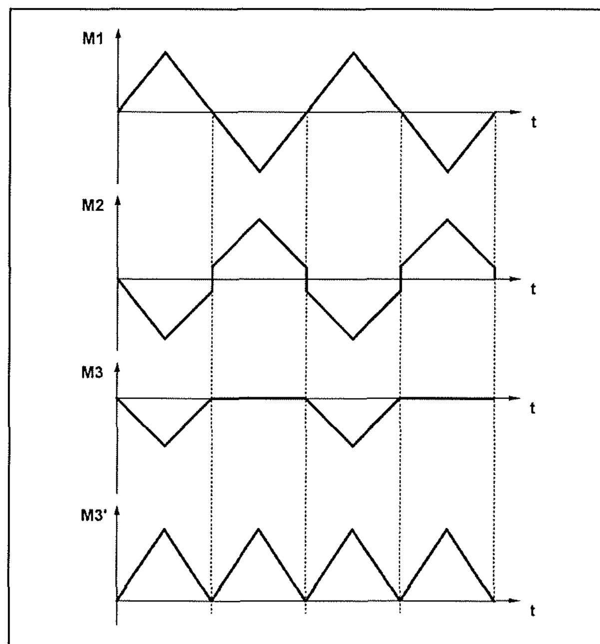
Het schema op de trainer

U kunt dit nuttige experiment aan de hand van figuur 3/97.19-2 opbouwen op twee van uw experimenteerprinten. In figuur 3/97.19-3 zijn de spanningen op de diverse punten van de schakeling weergegeven, als u aan de ingang een driehoekvormige spanning aanlegt.
U ziet nu dat IC1 zich inderdaad keurig gedraagt. De grote spanningssprong naar een van de voedingsspanningen treedt nu niet meer op.

97.19 De op-amp als nauwkeurige gelijkrichter



Figuur 3/97.19-2: De schakeling op uw experimenteerprinten.



Figuur 3/97.19-3: De spanningen op de belangrijkste punten van de schakeling.

Dat komt door de dubbele terugkoppeling en draagt, zoals reeds geschreven, bij tot het goede hoogfrequente gedrag van de schakeling.

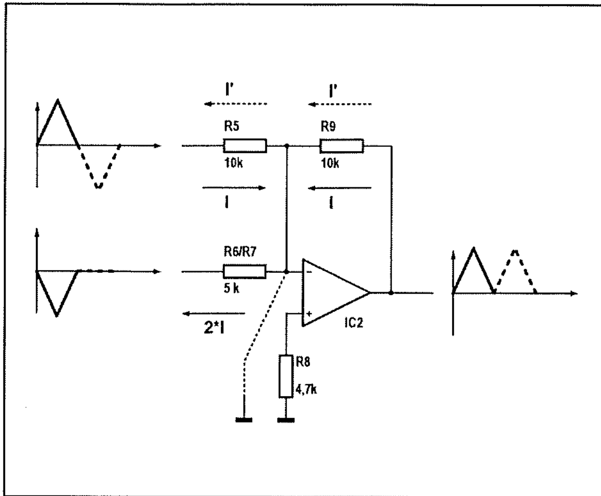
Verklaring van de werking

De gedetailleerde werking van de schakeling kunnen we het beste verklaren aan de hand van de tekeningen van figuur 3/97.19-4.

Maar eerst een paar feiten recapituleren:

- stroom loopt steeds van + naar -, aan de hand van de richting van de stroom door een weerstand kunnen we bepalen hoe de polariteit is van de spanningsval over die weerstand;
- bij de inverterende mengversterker ligt de negatieve ingang van de op-amp virtueel aan de massa, de spanning op dat punt is nul;
- de ingangsweerstand van de inverterende ingang is zeer hoog, de stroom die in of uit de op-amp vloeit is te verwaarlozen;
- de weerstanden tussen de twee ingangen en de inverterende ingang van de op-amp en de terugkoppelweerstand verhouden zich als 1 tot 0,5 tot 1 (vandaar de parallel geschakelde weerstanden R6 en R7).

97.19 De op-amp als nauwkeurige gelijkrichter



Figuur 3/97.19-4: De werking van de mengtrap voor positieve en negatieve ingangsspanningen.

Optie 1: een positieve spanning aan de ingang

Deze spanning vinden we, door de werking van IC1, even groot maar negatief terug op punt M3. Door weerstand R5 loopt een bepaalde stroom I in de getekende richting, dus naar de op-amp IC2 toe.

Door weerstand R6/R7 loopt een tweemaal zo grote stroom, in tegengestelde richting. Op het knooppunt tussen alle weerstanden (de inverterende ingang) komt een stroom I aan en gaat een stroom 2*I weg. Er ontbreekt dus een "komende" stroom I en deze kan alleen via de terugkoppelweerstand R9 worden aangeleverd. Door R9 vloeit een stroom in de getekende richting, hetgeen betekent dat de uitgang van de op-amp op een positieve spanning staat. Omdat R9 en R5 even groot zijn, moeten ook de spanningsvallen over beide weerstanden gelijk zijn.

Over R5 staat de ingangsspanning, dus ook over R9 meten we dezelfde spanning. De inverterende ingang staat op nul volt, conclusie is dat de uitgangsspanning gelijk is aan de ingangsspanning. Een positieve spanning op de ingang wordt omgezet in precies dezelfde spanning op de uitgang.

Optie 2: een negatieve spanning aan de ingang

Op punt M3 staat nu geen spanning, want diode D1 spert en de inverterende ingang van IC1 staat op nul volt. Er vloeit dus nu geen stroom door de weerstand R6/R7.

Door R5 vloeit wél stroom, maar nu van het knooppunt weg. Als er een stroom Í wegvloeit uit het knooppunt, dan moet er van elders een even grote stroom naar dat punt toe vloeien. Dat kan natuurlijk alleen maar via R9, die over deze weerstand een spanning opbouwt, precies gelijk aan de spanning bij een positieve ingang. Conclusie: een negatieve spanning aan de ingang wordt omgezet in een even grote, maar positieve spanning.

Besluit

Hiermee is de werking van de ideale gelijkrichter verklaard.

Een slotopmerking: de nauwkeurigheid van de schakeling hangt af van de precieze weerstandsverhoudingen.

Deze luiden:

R1 = R3 = R5 = R9

en

R6/R7 = ½ * R1

Het gebruik van 1 % weerstanden is noodzakelijk!

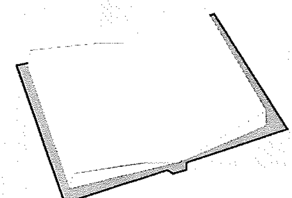
3/97.20

De op-amp als topdetector

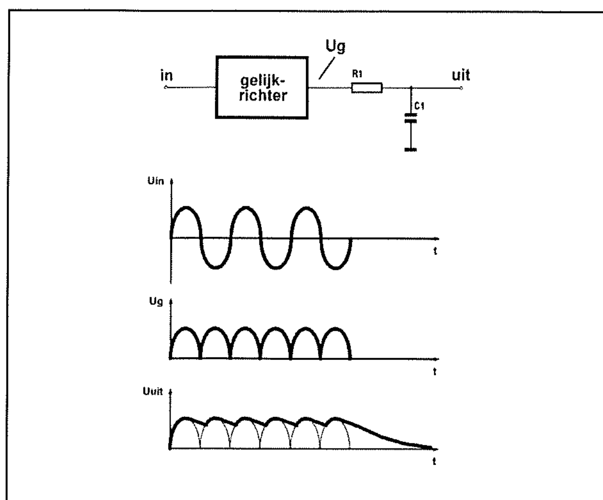
Inleiding
De in de vorige experimenten beschreven gelijkrichters vormen een wisselspanning om in een pulserende gelijkspanning. Deze spanning is niet zonder meer geschikt voor verdere bewerking. Vaak zult u immers de grootte van de wisselspanning willen meten en dan moet u een zo glad mogelijk verlopende spanning hebben.
Dat kunnen we bereiken door over de uitgang van de gelijkrichter een condensator te plaatsen. Deze condensator laadt zich bij iedere halve periode van de ingangsspanning op tot de topwaarde en gaat tussen twee halve perioden weer langzaam ontladen. Het resultaat is een gladgestreken signaal, wel met een aanzienlijke rimpel. Deze rimpel kunnen we nog kleiner maken door het uitgangssignaal van de gelijkrichter af te vlakken met een RC-netwerkje. Over de condensator ontstaat dan een gelijkspanning, waarvan de grootte overeenkomt met de gemiddelde waarde van de wisselspanning.
Zoals uit figuur 3/97.20-1 blijkt, reageert deze schakeling vrij snel op variaties aan de ingang. Als het wisselspanningssignaal wegvalt, dan zal de gelijkspanning op de uitgang vrij snel naar nul gaan, door het ontladen van de condensator C via de weerstand R en de zeer lage uitgangsimpedantie van de op-amp. Die snelle reactie is in dit geval ook noodzakelijk, want we willen uiteraard geen half uur wachten op de resultaten van de wisselspanningsmeting.
Er zijn echter ook toepassingen te verzinnen, waarbij we de spanning op de condensator zo lang mogelijk willen vasthouden. Denk bijvoorbeeld aan een VU-meter, die niet het gemiddelde signaal moet weergeven, maar de pieken uit het signaal.

De topdetector
Voor zo'n geval kunnen we een beroep doen op een zogenaamde topdetector, waarvan het meest eenvoudige schema in figuur 3/97.20-2 is weergegeven.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.5

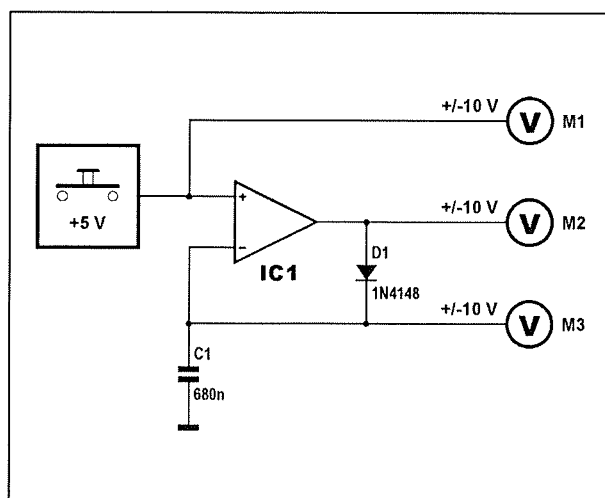


97.20 De op-amp als topdetector

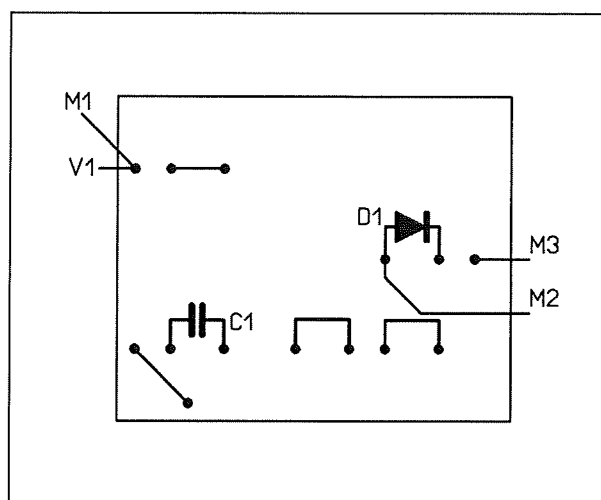


Figuur 3/97.20-1: Een RC-netwerkje (laagdoorlaat) zet de gelijkgerichte wisselspanning van de op-amp gelijkrichter om in een meetbare gelijkspanning.

De schakeling koppelt het positieve uitgangssignaal terug naar de inverterende ingang via de geleidende diode D1 en schakelt de op-amp uit voor negatieve uitgangsspanningen. Een systeem, bekend van de werking van de ideale diode.



Figuur 3/97.20-2: Het eenvoudigste schema van de topdetector.



Figuur 3/97.20-3: De schakeling op onze experimenteerprint.

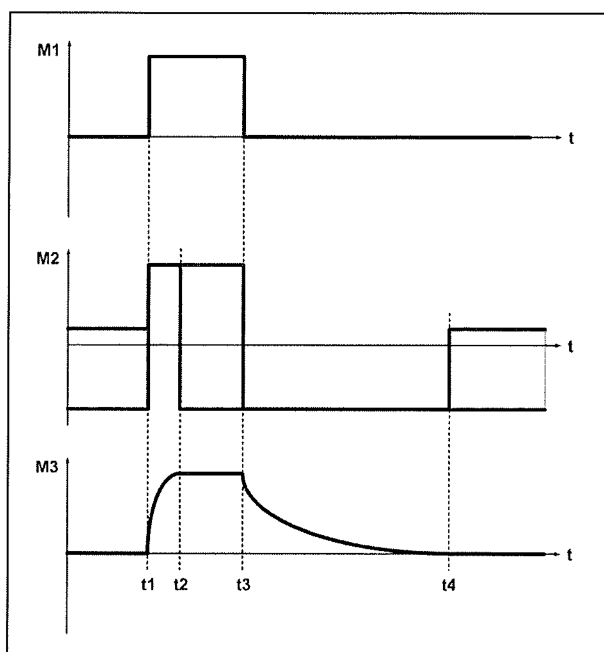
In figuur 3/97.20-3 is de schakeling op onze universele trainer getekend.

Werking van de schakeling

Aan de hand van de grafieken van figuur 3/97.20-4 kunnen we de werking van de schakeling doorgronden. Aan de ingang wordt een pulsvormige spanning aangesloten, die we door middel van een van de drukknoppen op het frontpaneel van de trainer kunnen opwekken. Stel de spanningspotentiometer in op +5 V.
Als aan de ingang geen spanning wordt aangeboden, met andere woorden, als de ingang op nul volt staat, dan zal de uitgangsspanning van de op-amp niet exact te voorspellen zijn. Het kan zijn dat de uitgang vastloopt tegen de negatieve voeding, of er kan een kleine positieve spanning te meten zijn. Een en ander is afhankelijk van de offset van de op-amp. Vandaar dat we in de grafieken dat gebied gearceerd hebben weergegeven.
Hoe dan ook, de ingang van de schakeling, af te takken van de inverterende ingang, is nul. Bij vastlopen van de op-amp tegen de negatieve voedingsspanning spert de diode, bij positieve uit-

97.20 De op-amp als topdetector

gangsspanning zal de geleidingsspanning van de diode ervoor zorgen dat de inverterende uitgang op hetzelfde potentiaal staat als de positieve ingang: nul volt.



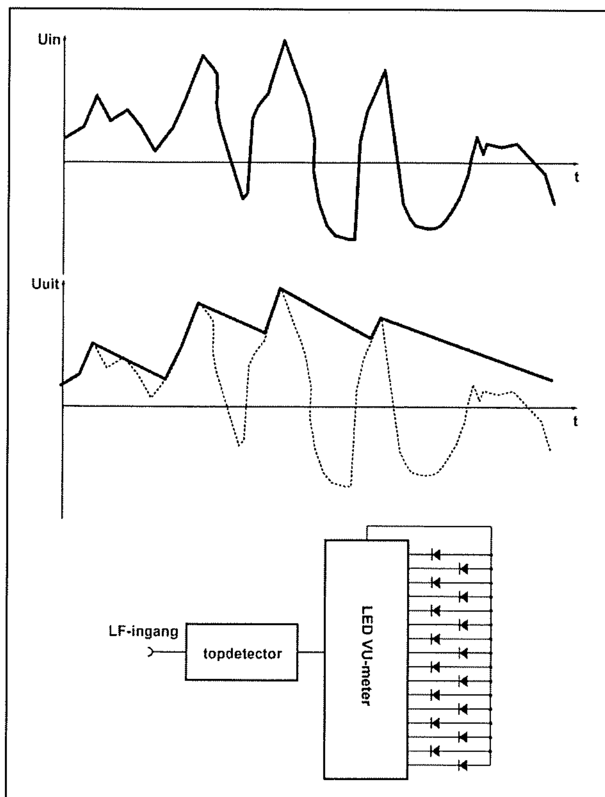
Figuur 3/97.20-4: De spanningen op de belangrijkste punten van de schakeling.

Bij het verschijnen van de positieve ingangspuls ontstaat er in eerste instantie een groot spanningsverschil tussen beide ingangen. De uitgang reageert hierop door vast te lopen tegen de positieve voedingsspanning. De diode gaat geleiden, de condensator wordt opgeladen via de lage uitgangsimpedantie van het IC. De uitgangsspanning van de topdetector stijgt dus vrij snel tot de topwaarde van de ingangspuls. Op tijdstip t2 is de spanning op de uitgang gelijk aan de ingangsspanning. De comparator klapt om. Zolang de ingangspuls aanwezig blijft, zal de uitgang van het IC steeds omslaan tussen +10 V en -10 V. De condensator ontlaadt immers en bovendien zorgt ieder rimpeltje op de ingangsspanning voor het ompolen van het spanningsverschil tussen beide ingangen.
Na het wegvallen van de ingangspuls is de spanning op de inverterende ingang groter dan de spanning op de niet-inverterende ingang. De uitgang loopt vast tegen de negatieve voedingsspanning, de diode spert. De condensator gaat nu zeer langzaam ontladen via de eigen lekweerstand van het onderdeel en de hoge ingangsimpedantie van de op-amp.
Zelfs met de relatief lage waarde voor C1 van 680 nF duurt het enige tientallen seconde alvorens de spanning tot nul is gedaald.

VU-meter

Met dit eenvoudige schakelingetje kunnen we een zeer gevoelige VU-meter opbouwen. Kijk maar figuur 3/97.20-5! Aan de uitgang van de topdetector wordt een LED VU-meter aangesloten. Deze elektronische meters zijn, vanwege hun traagheidsloze reactie op de ingangsspanning, uiteraard ideaal voor het opbouwen van top VU-meters.
Aan de ingang van de schakeling wordt een LF-spanning aangeboden, bijvoorbeeld de uitgangsspanning van een muziekinstrument. De topdetector zal het verloop van de (positieve) ingangsspanning volgen en na een piek langzaam teruglopen. De korte piekspanning, die zonder topdetector niet eens zichtbaar zou zijn op de uitlezing, wordt nu als het ware verbreed, zodat we een prettige uitlezing van het maximale uitgangssignaal van het muziekinstrument verkrijgen en we onze installatie (bijvoorbeeld een mengpaneel met een recorder) kunnen afregelen op onvervormde opname van de grootste piek.

97.20 De op-amp als topdetector



Figuur 3/97.20-5: Het schema van een VU-meter rond onze topdetector.

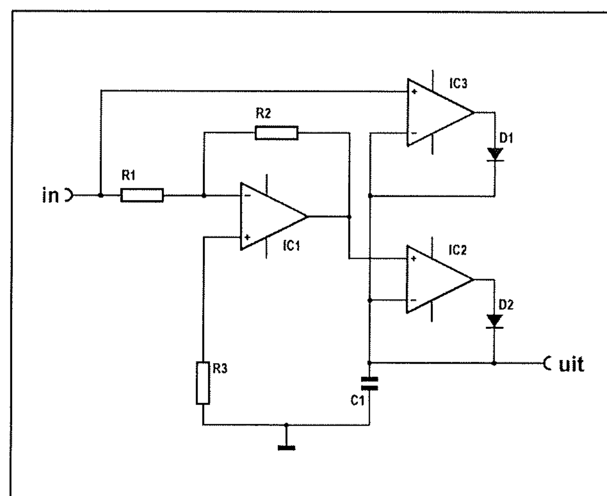
Opmerking

De schakeling heeft één groot nadeel en dat is dat ze alleen reageert op positieve toppen. Vandaar dat echte piekmeters zijn uitgerust met twee topdetectoren, die zowel de positieve als de negatieve pieken omzetten in een spanning die een meter kan sturen.

Het eenvoudigste schema van de uitgebreide schakeling is getekend in figuur 3/97.20-6.

De op-amp's IC2 en IC3 zijn de twee topdetectoren. Er is slechts één condensator C1 noodzakelijk, de detector die de grootste ingangsspanning te verwerken krijgt, zal de condensator opladen.

IC1 is niets anders dan een inverterende x1 versterker. Deze inverteert het wisselspanningsingangssignaal. Een positieve top verschijnt dus even groot, maar negatief van polariteit, aan de uitgang. De ingang van IC3 gaat rechtstreeks naar de ingang van de schakeling en verwerkt de positieve toppen. De negatieve toppen worden door IC1 geïnverteerd en sturen de tweede topdetector rond IC2.

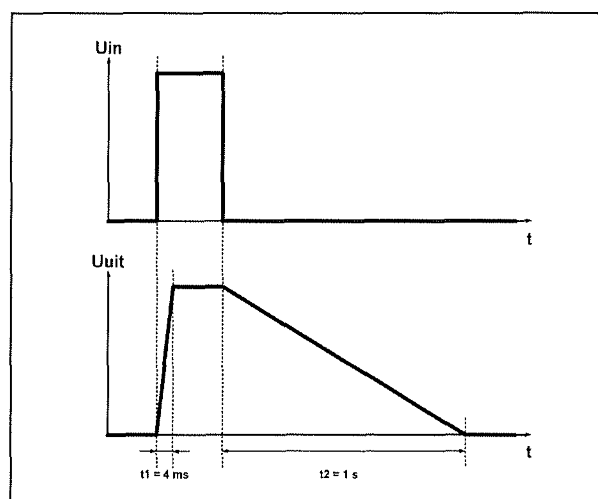


Figuur 3/97.20-6: Een schakeling die zowel op positieve als op negatieve toppen reageert.

3/97.21

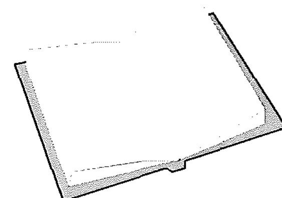
De op-amp als ideale topdetector

Inleiding
De topdetector van experiment 3/97.20 zult u nooit in professionele apparatuur aantreffen. Waarom niet?
Omdat de belastingsweerstand van de schakeling de werking beïnvloedt. We hebben gesteld dat de ontlading van de condensator wordt bepaald door de eigen ontlaadstroom van het onderdeel en door de geringe stroom die de op-amp opeist. Daarnaast echter staat de belasting, bijvoorbeeld een LED VU-meter, rechtstreeks over de condensator. Deze schakeling trekt uiteraard ook een stroom en deze stroom bepaalt het ontladen van de condensator. Het is altijd een zeer ongewenste situatie als de werking van een schakeling wordt beïnvloed door de schakeling die erop is aangesloten.
Dat is al een eerste reden om deze eenvoudige schakeling af te wijzen.
Daarnaast zijn er bepaalde normen, die de reactietijd van een piek VU-meter op een plotselinge spanningssprong vastleggen, zie figuur 3/97.21-1. Volgens de BBC-normen, een organisatie die in de vroege dagen van de geluidsreproductie heeft gepionierd en vandaar een aantal eigen normen internationaal erkend heeft gezien, moet een piekmeter in 4 milliseconde reageren op een piek aan de ingang. Na het wegvallen van de piek moet de spanning in ongeveer 1 seconde terugvallen naar nul.

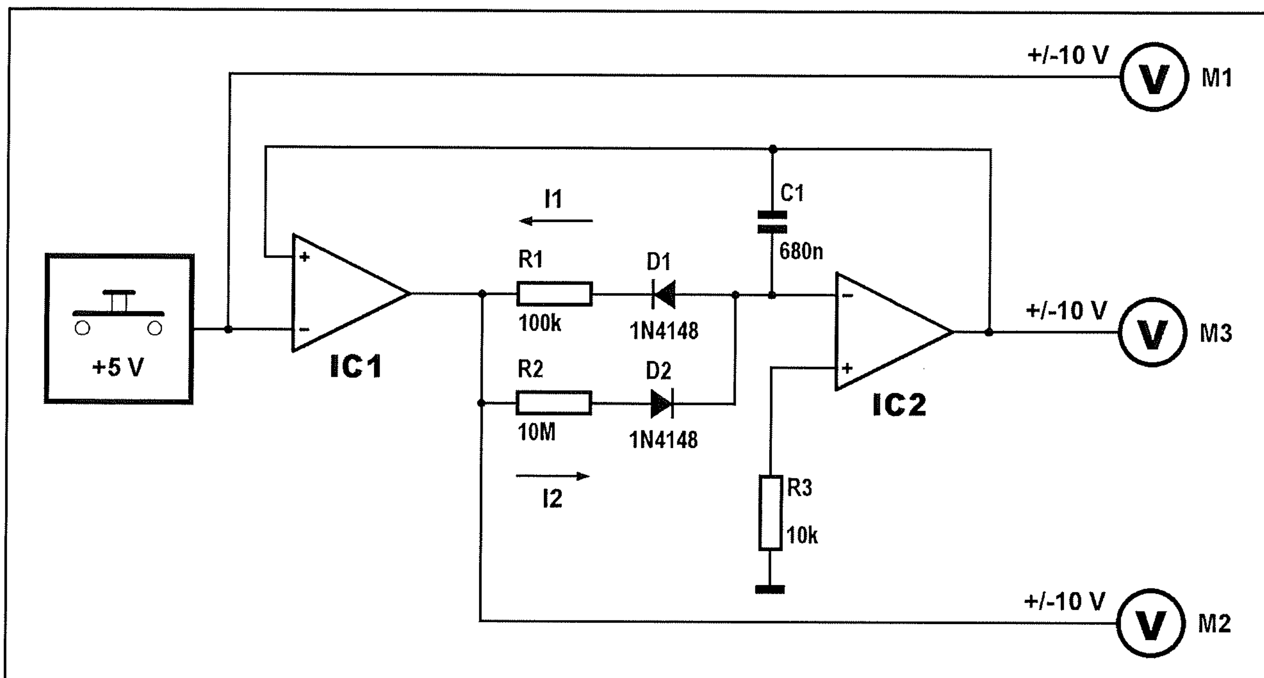


Figuur 3/97.21-1: De respons van een topdetector op een ingangspuls is door internationale normen vastgelegd.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.5



97.21 De op-amp als ideale topdetector



Figuur 3/97.21-2: Het schema van een ideale topdetector.

Deze tijden zijn met de eenvoudige basisschakeling van het vorige experiment niet zo goed instelbaar en vandaar dat men een uitgebreide schakeling heeft ontworpen, waarbij zowel de reactietijd als de terugvaltijd door middel van een weerstandje over een breed gebied instelbaar zijn.

De schakeling

De schakeling is getekend in figuur 3/97.21-2 en maakt gebruik van twee operationele versterkers.
U herkent ongetwijfeld bekende zaken!
IC1 heeft geen terugkoppeling en zal dus wel als comparator zijn geschakeld. IC2 heeft een condensator tussen in- en uitgang, we plakken hem dus maar het etiketje “integrator” tussen de pootjes. Terecht!
Zo’n combinatie van een comparator en een integrator hebben wij u reeds voorgesteld als opwekker van driehoek- en vierkantsgolven. Het gekke (maar tevens het fascinerende van de elektronica) is nu dat we dezelfde schakeling met een paar kleine wijzigingen kunnen omtoveren in een ideale topdetector.

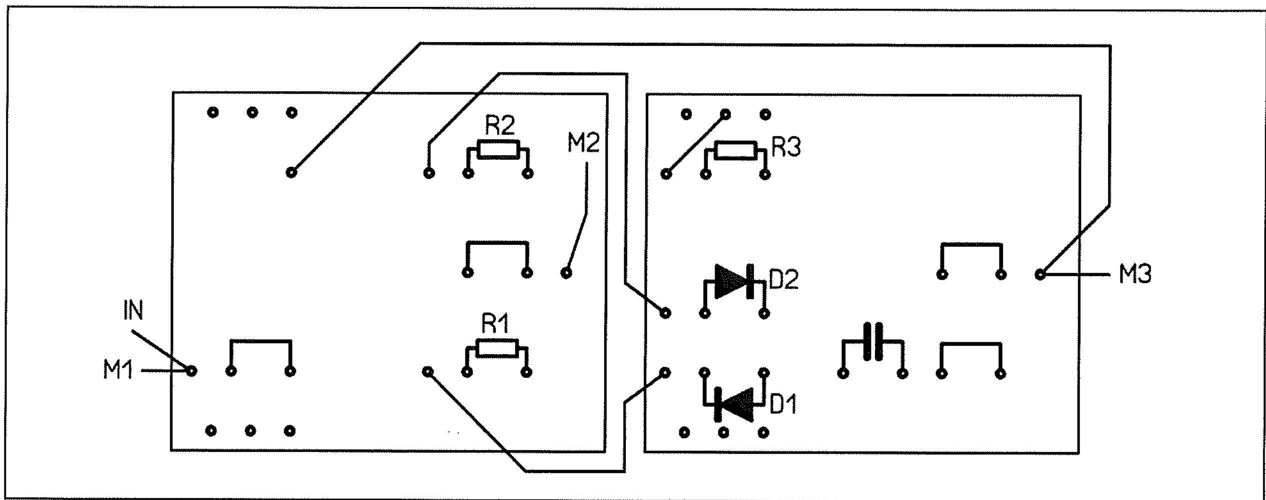
Het schema op onze trainer

In figuur 3/97.21-3 is de bedrading van dit experiment op onze twee experimenteerprintjes voorgesteld.

De werking

De werking van de schakeling volgt uit de grafieken van figuur 3/97.21-4. Bij nul volt aan de ingang zal de uitgang van de schakeling op- en neergaan tussen enige millivolt positief en enige millivolt negatief. Onmeetbaar dus op onze meters, maar wel aanwezig.
Als de uitgangsspanning iets positief wordt, door de offsetdrift van de integrator, dan slaat de comparator om. De positieve ingang is dan immers positief ten opzichte van de nul volt op de negatieve ingang.

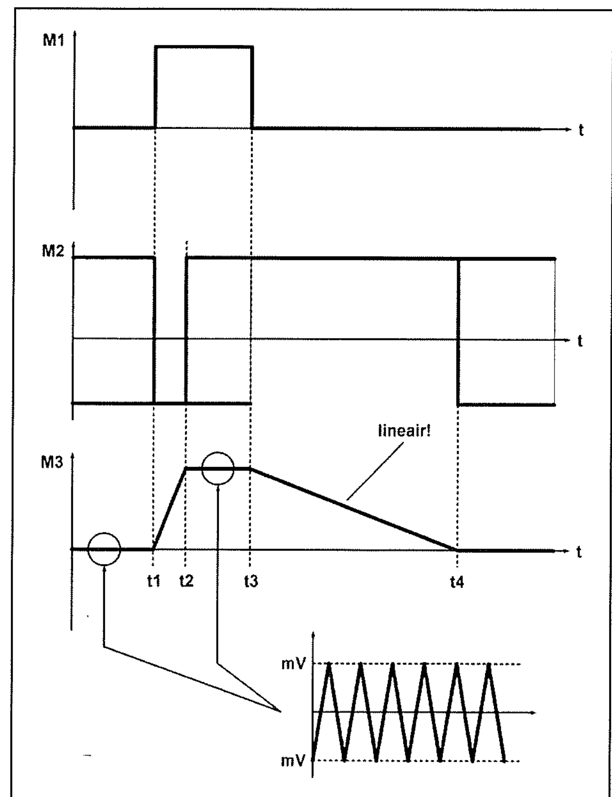
97.21 De op-amp als ideale topdetector



Figuur 3/97.21-3: De schakeling in de praktijk.

De uitgang van de comparator wordt positief. De integrator wordt gestuurd door een stroom I2 via R2 en D2. Deze stroom zal de uitgangsspanning van de integrator laten dalen. Na enige tijd is de uitgangsspanning van de schakelaar enige millivolt negatief, de comparator klapt om. De negatieve uitgangsspanning ontlaadt de condensator van de integrator met een stroom I1 via R1 en D1. De uitgangsspanning wordt positief. Kortom, met nul volt aan de ingang schommelt de uitgangsspanning rond de nul en de uitgang van de comparator klapt voortdurend om.

Op tijdstip t1 wordt er een positieve puls aangeboden aan de negatieve ingang van IC1. De uitgang van de comparator reageert dadelijk door de negatieve voedingsspanning op te zoeken. De condensator C1 wordt nu opgeladen met een stroom I1. De uitgangsspanning van de integrator stijgt. De waarde van I1 wordt bepaald door de waarde van R1 en natuurlijk ook door de waarde van de integratiecondensator C1. Door deze weerstand instelbaar te maken kunnen we het volgen van de ingang door de uitgang aanpassen aan de genoemde norm.



Figuur 3/97.21-4: Grafische verklaring van de werking van de schakeling.

Als de uitgangsspanning iets groter wordt dan de ingang, klapt de comparator om. Ook nu dus gaat de uitgangsspanning van de schakeling enige milli-

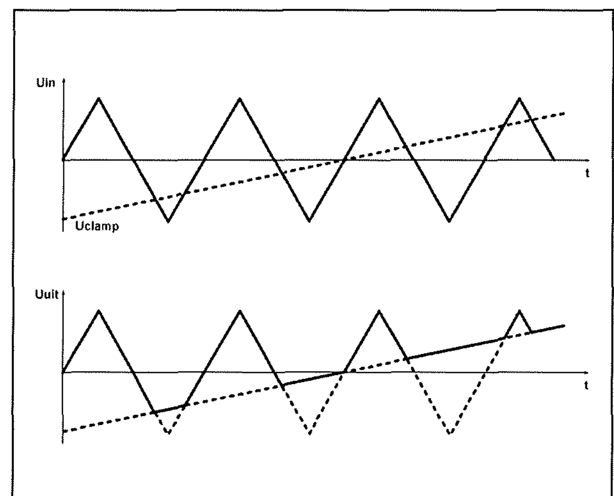
volt schommelen rond de topwaarde van de ingangsspanning. De uitgang van de comparator zal voortdurend omklappen tussen het ene en het andere voedingsniveau.
Wat gebeurt er na t3, het moment waarop de ingangsspanning naar nul gaat? De positieve ingang van de comparator is positiever dan de negatieve ingang, bijgevolg levert deze schakeling een positieve uitgangsspanning. Deze spanning zal, via weerstand R2 en diode D2, de condensator gaan ontladen. De grootte van de ontlaadstroom is instelbaar door het variëren van de waarde van weerstand R2.

Slotopmerking
Tot slot zij nog opgemerkt, dat ook deze schakeling alleen reageert op positieve pulsen. Vandaar dat u haar moet combineren met een tweede schakeling. Het grapje van de inverterende versterker gaat nu echter niet op. We hebben immers nu slechts één topdetector en geen twee eenvoudig te combineren schakelingen. Vandaar dat men deze schakeling meestal laat voorafgaan door de in een vorig experiment besproken volle periode gelijkrichter. De volledige schakeling van de topdetector bevat dan niet minder dan vier operationele versterkers, maar dan heeft u wel het neusje van de zalm op dit gebied. En het leuke is dat u, aan de hand van onze experimenten, gemakkelijk is staat bent zo'n schakeling zélf te ontwerpen.

3/97.22

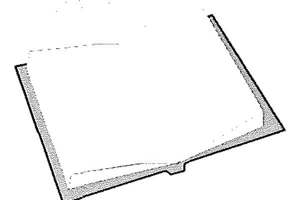
De op-amp als clampschakeling

Inleiding
Een clampschakeling is een schakeling die een signaal vastlegt op een bepaalde clampspanning. Als dit wat cryptisch klinkt, kijk dan naar figuur 3/97.22-1. Een driehoekvormige ingangsspanning wordt in een clampschakeling vergeleken met een spanning U_{clamp}. Zolang de ingangsspanning groter is dan de clampspanning, zal de uitgang de ingang volgen. Als de ingangsspanning kleiner wordt dan de clampspanning, zal de uitgang de clampspanning volgen.
De clampschakeling legt dus een spanning vast op een bepaald niveau. De uitgangsspanning van de schakeling zal nooit onder de clampspanning kunnen zakken.
Uiteraard kunnen we net zo goed een schakeling ontwerpen, die omgekeerd werkt: de uitgangsspanning zal dan nooit boven de clampspanning kunnen stijgen.
In feite is zo'n schakeling reeds bekend. De simpele "ideale" diode van hoofdstuk 3/97.17, immers, was een clampschakeling die ervoor zorgde dat de uitgangsspanning de ingang volgde tot aan nul volt toe. Negatiever kon de uitgang niet worden. De eenvoudige gelijkrichter is dus een clampschakeling met een clampspanning van nul volt. Maar een "echte" clampschakeling heeft een instelbare clampdrempel en u kunt er dus heel universeel mee aan de slag.



Figuur 3/97.22-1: De werking van een clampschakeling wordt verduidelijkt aan de hand van deze grafieken.

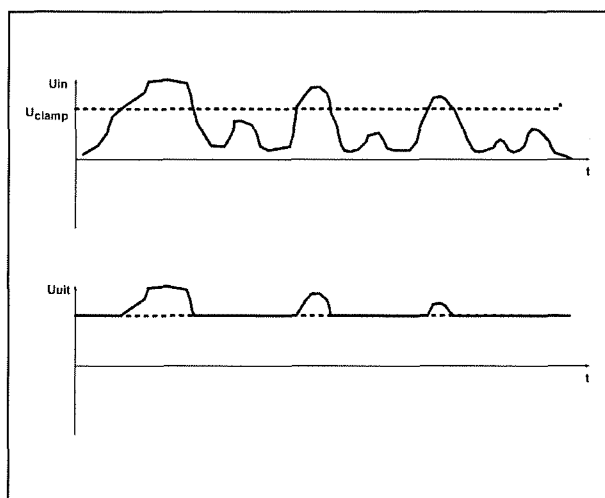
LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.5
Hoofdstuk 3/97.17



97.22 De op-amp als clampschakeling

Toepassingen

Het ligt voor de hand te veronderstellen dat de schakeling van de clamp veel overeenkomst vertoont met de enkelvoudige ideale gelijkrichter. Maar voor we aan de behandeling van het schema toekomen eerst een zinvoller vraag: wat doet u met zo'n schakeling? Figuur 3/97.22-2 geeft het antwoord.

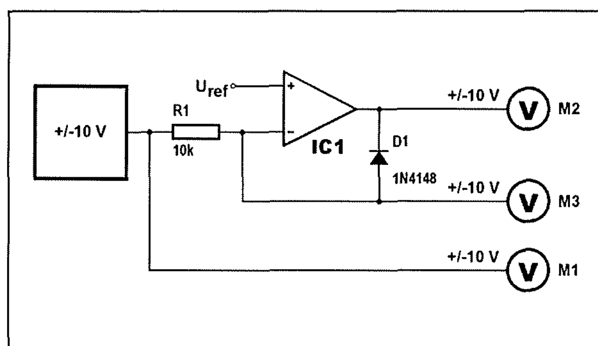


Figuur 3/97.22-2: Het uitfilteren van ongewenste stoorsignalen met een clampschakeling.

Het ingangssignaal U_{in} bestaat uit een reeks signaalpiekjes, met een heleboel ruissignaaltjes er tussendoor. Met dit signaal willen we iets gaan doen, bijvoorbeeld het aantal pieken per seconde meten. Als we dit signaal zonder meer aan de ingang van een frequentieteller zouden aanbieden, dan zou deze meter een veel te hoge frequentie registreren. Het apparaat kan immers geen onderscheid maken tussen de te tellen signaalpieken en de ruispiekjes.
Door middel van het tussenschakelen van een clampschakeling met een instelbare clampdrempel kunnen we de ongewenste ruispiekjes uit het uitgangssignaal filteren, zodat de frequentieteller alleen de te tellen signaalpieken registreert.
Clampkringen worden ook toegepast in de geluidselektronica, waar we er zeer vervreemdende geluidseffecten mee kunnen opwekken.

Het schema

Zoals reeds te verwachten was, vertoont het schema van figuur 3/97.22-3 zeer veel overeenkomst met het schema van de ideale diode.

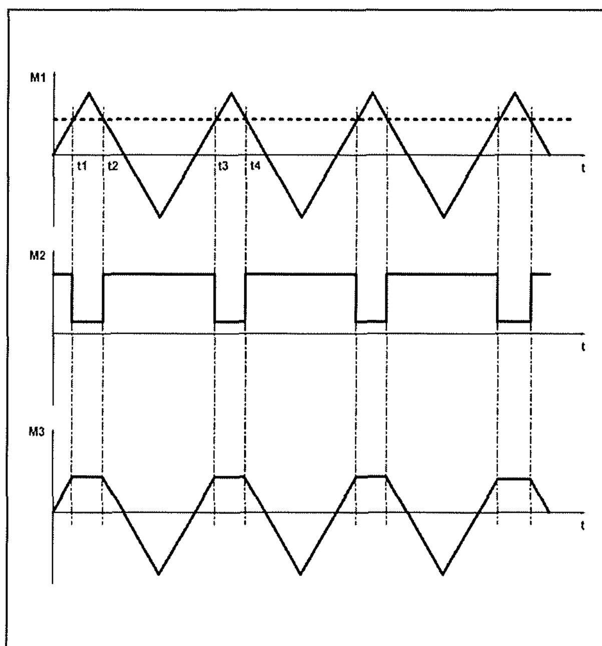


Figuur 3/97.22-3: De eenvoudigste schakeling van een clampkring die clampt op een bovendrempel. De spanning op de uitgang kan niet positiever worden dan de clampdrempel U_{ref}.

De werking van de schakeling wordt verduidelijkt aan de hand van de grafieken van figuur 3/97.22-4.
Stel dat de ingangsspanning kleiner is dan de referentiespanning. De negatieve ingang op de op-amp is dan negatiever dan de positieve ingang, de uitgang loopt vast tegen de positieve voedingsspanning. De diode D1 gaat bijgevolg sperren. Tussen de in- en de uitgang staat nu alleen weerstand R1 en als we de schakeling met een zeer hoge weerstand belasten (zoals het geval is met de meters van de trainer), dan meten we op de uit-

97.22 De op-amp als clampschakeling

gang dezelfde spanning als op de ingang.
Op tijdstip t1 wordt de ingangsspanning even groot dan de clampreferentie. De negatieve ingang van de op-amp wordt positiever dan de positieve ingang, de schakeling klapt om. De uitgang wordt nu negatief, de diode gaat geleiden en de op-amp stelt de spanning op de negatieve ingang gelijk aan de spanning op de positieve ingang. De uitgang blijft op het clampniveau staan.



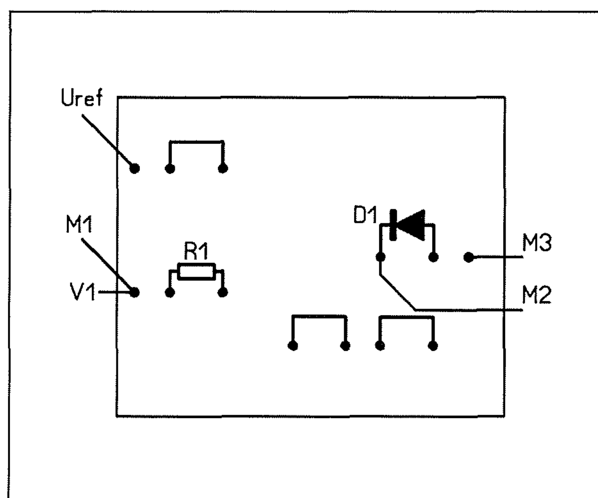
Figuur 3/97.22-4: De werking van de schakeling grafisch toegelicht.

De schakeling werkt nu als een buffer, waarbij de uitgang en de negatieve ingang de spanning op de positieve ingang overnemen.

De situatie blijft gehandhaafd, tot de negatieve ingang weer lager wordt dan de positieve, de uitgang van de op-amp positief wordt, de diode spert en de op-amp in feite wordt uitgeschakeld. De uitgang is dan weer rechtstreeks verbonden met de ingang.

De clampkring op de trainer

In figuur 3/97.22-5 is de schakeling getekend zoals u deze op uw experimenteerprint moet onderbrengen. U weet inmiddels zonder enige twijfel hoe u de werking van de schakeling kunt controleren en hoe u verder met de schakeling op eigen initiatief kunt experimenteren!



Figuur 3/97.22-5: De clampschakeling op uw experimenteerprint.

97.22 De op-amp als clampschakeling

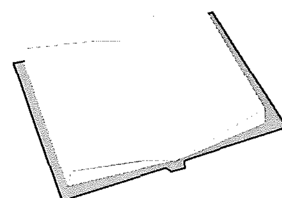
3/97.23

De op-amp als sinusgenerator

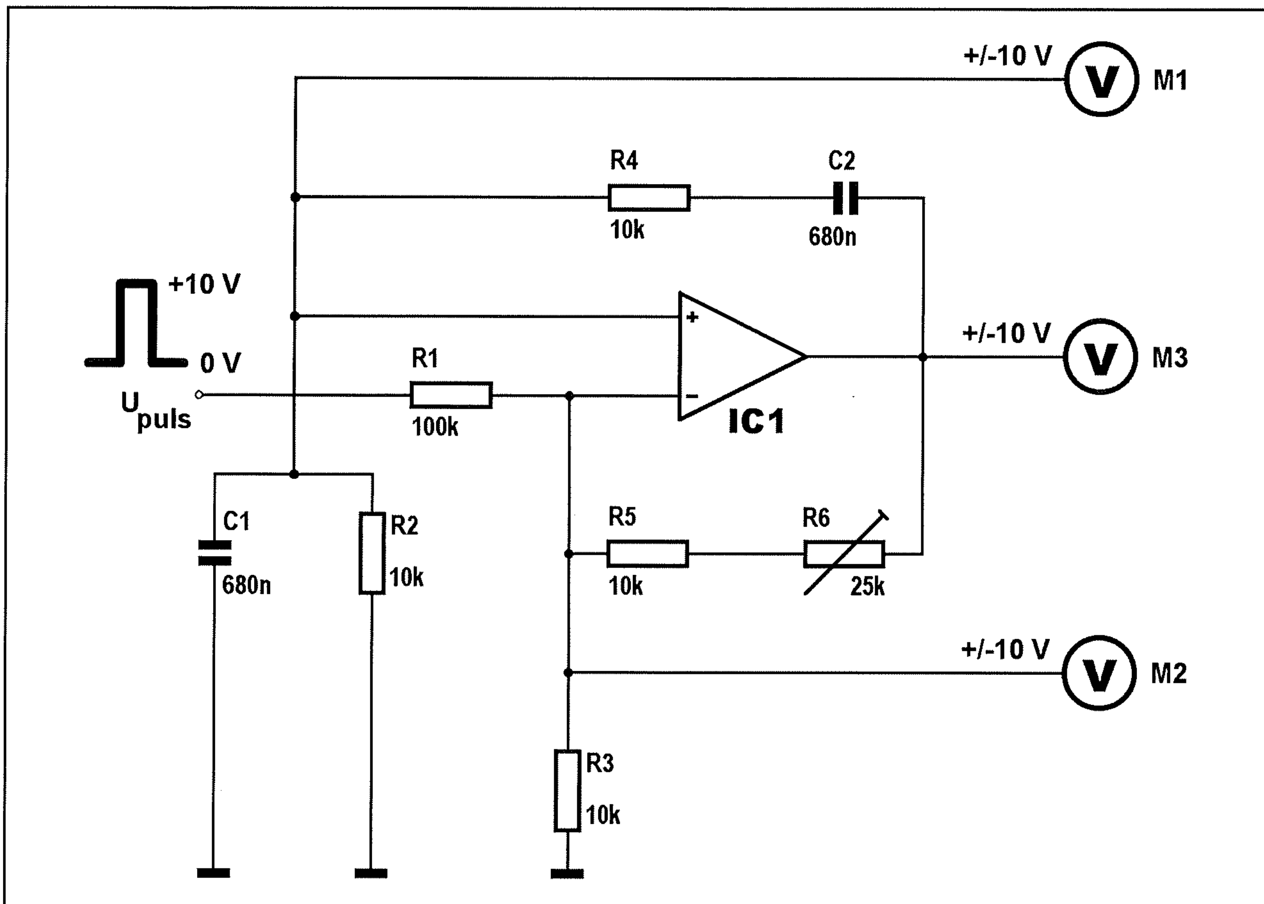
Inleiding
In een van de vorige experimenten hebben we uitgelegd, hoe we een sinusspanning kunnen opwekken uit een driehoekspanning door middel van een niet-lineaire terugkoppeling. Het nadeel van deze schakeling was de relatief hoge vervorming op de sinus. Met een op-amp kunnen we echter ook rechtstreeks een sinusvormige spanning opwekken en dit met een bijzonder lage vervorming!
Alvorens in te gaan op de schakeling die daarvoor nodig is, moeten we eerst iets vertellen over ruis. Ruis is een verschijnsel dat eigen is aan alle elektronische schakelingen. In het algemeen kunnen we ruis omschrijven als een stoorspanning, die optreedt in iedere schakeling. Er zijn verschillende fysische processen bekend waardoor ruis kan wordt opgewekt. Een van de meest voorkomende is de zogenaamde thermische ruis. Onder invloed van de temperatuur gaan vrije elektronen in onderdelen van het ene atoom overspringen naar een ander. Deze elektronenbeweging veroorzaakt een miniem stroompje en de som van al deze uiterst kleine stroompjes wekt een ruisspanning op.
Uit deze verklaring zal duidelijk zijn dat ruis een statistisch verschijnsel is. Het exacte verloop van een ruisspanning is niet te voorspellen, we kunnen immers niet bepalen wanneer een bepaald atoom een elektron zal afstoten. Ruis wordt gekenmerkt door een breed frequentiespectrum. Als we een ruisspanning zouden analyseren naar de frequentie-inhoud van het signaal, dan zouden we vaststellen dat zowat alle frequenties in min of meerdere mate in het ruissignaal aanwezig zijn.

Het principe van de sinusgenerator
Na deze geleerde inleiding kunnen we de werking van een sinusoscillator gaan verduidelijken. Het basisschema is getekend in figuur 3/97.23-1. U ziet twee terugkoppelingen van de uit- naar de ingangen. De negatieve ingang is door middel van een weerstandsdeler R3, R5 en R6 verbonden met de uitgang. Deze terugkoppeling herkent u ongetwijfeld van de niet-inverterende versterker.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.8
Hoofdstuk 3/97.14



97.23 De op-amp als sinusgenerator

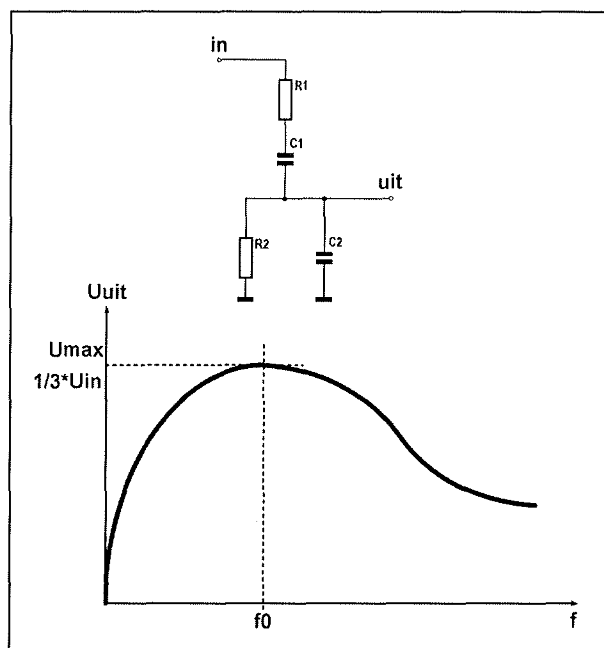


Figuur 3/97.23-1: Het basisschema van een sinusocillator met een op-amp en een zogenaamde "brug van Wien".

Tussen de uitgang en de massa staat een tweede netwerk, opgebouwd uit twee weerstanden en twee condensatoren. Zo'n netwerk noemt men een "brug van Wien". Het knooppunt van dit netwerkje gaat naar de positieve ingang. Een eigenschap van deze RC-combinatie is dat ze frequentieselectief is. Dat wil zeggen dat de verzwakking van het netwerk niet constant is, maar afhankelijk is van de frequentie. In figuur 3/97.23-2 is dat weergegeven. Als we aan de ingang van het netwerk een wisselspanning leggen met constante grootte maar variërende frequentie, dan meten we op de uitgang een frequentiekarakteristiek zoals weergegeven op de grafiek. Voor lage frequenties van het ingangssignaal meten we nauwelijks signaal op de uitgang. Laten we de frequentie stijgen, dan stellen we vast dat de uitgangsspanning toeneemt. Bij een bepaalde frequentie f_0 meten we een maximale uitgangsspanning, die overigens nog kleiner is dan de spanning op de ingang. Bij verder stijgen van de frequentie gaat de uitgangsspanning weer afnemen. We kunnen dus besluiten dat de verzwakking van het netwerk voor één bepaalde frequentie minimaal is. Dit valt te verklaren uit de frequentie-afhankelijke wisselstroomweerstand van een condensator. Zoals bekend, neemt de wisselstroomweerstand van een condensator af met stij-

97.23 De op-amp als sinusgenerator

gende frequentie. Voor signalen met een lage frequentie hebben beide condensatoren een grote weerstand. De weerstandsdeling wordt dan bepaald door de zeer hoge waarde van de impedantie van C1 en de veel lagere waarde van R2.

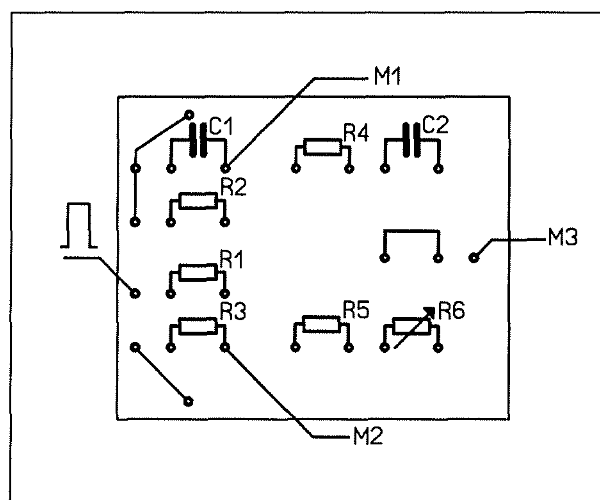


Figuur 3/97.23-2: De frequentiekarakteristiek van een brug van Wien vertoont een minimale verzwakking bij één welbepaalde frequentie f_0.

Er verschijnt slechts weinig spanning aan de uitgang. Voor hoge frequenties hebben de condensatoren een zeer lage impedantie. De spanningsdeling wordt dan hoofdzakelijk bepaald door de lage waarde van de impedantie van C2 en de veel hogere weerstand R1. Ook nu verschijnt er slechts een fractie van de ingangsspanning aan de uitgang. Tussen beide frequentiegebieden in ligt één frequentie, waarbij de wisselstroomweerstand van de condensatoren precies gelijk is aan de waarde van de weerstanden.

De spanningsdeler verzwakt dan minimaal, de uitgangsspanning is maximaal maar toch nog steeds slechts gelijk aan een derde van de ingangsspanning.
Met deze kennis gaan we de sinusgenerator van figuur 3/97.23-1 aanpakken.

Experimenteren met de schakeling
Bouw de schakeling op de proefprint volgens figuur 3/97.23-3, waarbij in eerste instantie de weerstand R1 niet met de puls drukknop wordt verbonden. Stel de instelpotentiometer R6 in op maximale weerstand.

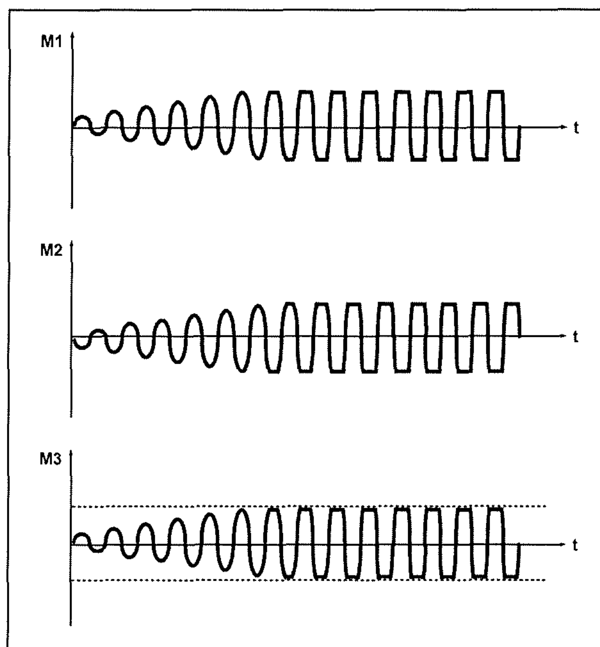


Figuur 3/97.23-3: Het schema van de sinusgenerator op de experimenteerprint.

Schakel nu de voedingsspanning in: er gebeurt niets, de uitgangsspanning blijft nul. Verdraai nu zeer langzaam de loper van de instelpotentiometer. Op een bepaald moment zal de naald van de meter M3, aangesloten op de uitgang, nauwelijks merkbaar gaan schommelen. Laat de instelpotentiometer onmiddellijk met rust en observeer wat er gebeurt. U zult waarnemen dat de schommelingen van de naald langzaam maar zeker groter worden. Na een tot twee minuten

97.23 De op-amp als sinusgenerator

slaat de meternaald te pletter tegen beide schaaleinden.
Wat er gebeurt is grafisch weergegeven in de karakteristieken van figuur 3/97.23-4. De uitgangsspanning neemt langzaam in grootte toe, is in eerste instantie sinusvorming, maar zal later ongeveer blokvormig gaan verlopen, omdat de versterker wordt overstuurd.
Hoe is dit te verklaren? Bij het inschakelen van het printje komt de schakeling onder spanning te staan en in ieder onderdeel wordt een kleine ruisspanning opgewekt. De ruisspanning op de uitgang wordt teruggekoppeld naar beide ingangen. Naar de positieve ingang via de frequentieselectieve werking van het RC-netwerk, naar de negatieve ingang via de weerstandsdeler. Een bepaalde frequentie zal minimaal verzwakt op de positieve ingang terecht komen, namelijk met een verzwakking van 1/3.
Zolang de versterker minder dan drie maal versterkt, zal er verder niets gebeuren. De verzwakking van het RC-netwerk wordt dan niet gecompenseerd door de versterking van de op-amp en de aanzet tot oscillatie, door de grote ruispuls bij het aanschakelen van de voedingsspanning, sterft uit.
Anders wordt het, als u door het verdraaien van de instelpotentiometer de versterking van de op-amp net iets boven een factor drie gaat instellen. Het minimaal verzwakt spanninkje uit de ruis met een bepaalde frequentie wordt dan door de op-amp net iets meer versterkt dan het verzwakt was door de RC-kring. Dit signaaltje doorloopt de op-amp en verschijnt iets groter op de uitgang. Het versterkt signaaltje wordt weer teruggekoppeld naar de positieve ingang, verschijnt daar iets groter dan voorheen en wordt wederom versterkt.



Figuur 3/97.23-4: Het spanningsverloop van de schakeling bij het starten van de oscillator.

Kortom, het signaal doorloopt telkens de op-amp en bij iedere kringloop verschijnt het iets groter op de uitgang. Op het laatst wordt het signaal zó groot, dat het de versterker overstuurt. De uitgangsspanning loopt vast tegen de voedingsspanningen, het signaal verwordt van een sinus tot een blokspanning met trage flanken.
In feite zou de sinusgenerator een stabiel signaal opwekken, als de versterking van de op-amp precies zo groot was dat de verzwakking van het RC-netwerk werd gecompenseerd.

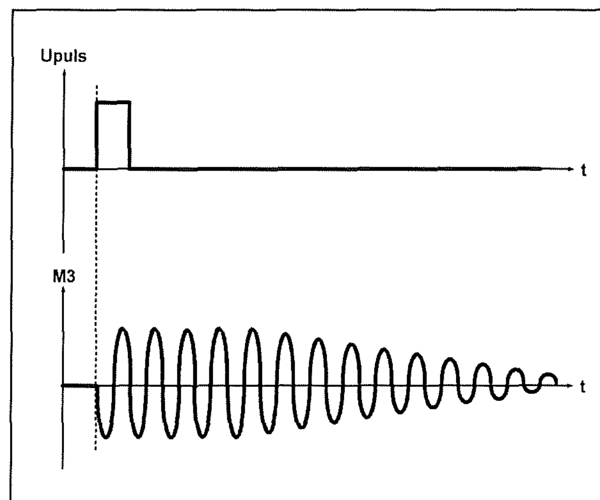
Het moet automatisch!
Het zal duidelijk zijn, dat dit nooit door middel van een simpel weerstandsdelertje is in te stellen. Immers, iedere afwijking van de voorwaarde: versterking van de op-amp is gelijk aan verzwakking van het frequentieselectief filter, zou het vastlopen van de uitgangsspanning te-

97.23 De op-amp als sinusgenerator

gen de voedingsspanning, of het uitsterven van de oscillatie tot gevolg hebben, ook al zou dit verschijnsel uren kunnen duren. Probeer het maar eens! Stel de instelpotentiometer zo in, dat op de uitgang een spanning van ongeveer 10 volt top-tot-top wordt opgewekt. Probeer nu dat uitgangssignaal constant te houden door het verdraaien van de instelpotentiometer. Het zal u niet lukken! Ofwel zal de uitgangsspanning gaan stijgen en uiteindelijk weer vastlopen tegen de voedingsspanning, ofwel zal de uitgangsspanning gaan dalen wat leidt tot het uitsterven van de oscillatie.
Wat we nodig hebben is een automatische regeling, die de versterking van de schakeling automatisch steeds zo instelt, dat de schakeling een uitgangssignaal met constante grootte opwekt.

Een tweede experiment

Alvorens we ons met dit soort schakelingen gaan bezig houden, doen we eerst nog een experimentje met de basisopzet. Sluit weerstand R1 aan op een van de puls drukknoppen op de trainer, waarbij de spanningssprong wordt ingesteld op +10 V. Regel nadien de instelpotentiometer R6 af, zodat de schakeling net niet oscilleert. Druk nu even op de puls drukknop. De schakeling gaat nu oscilleren. Na het loslaten van de drukknop blijft de schakeling oscilleren, maar de amplitude van het uitgangssignaal sterft langzaam weg. De optredende spanningsvormen zijn in figuur 3/97.23-5 afgebeeld. Dit aspect van een sinusoscillator wordt in de praktijk vaak toegepast, bijvoorbeeld bij muziekschakelingen. Door middel van zo'n wah-wah schakeling (zo wordt deze schakeling genoemd) kan men de sustain of het uitsterven van een gitaaraanslag verlengen.



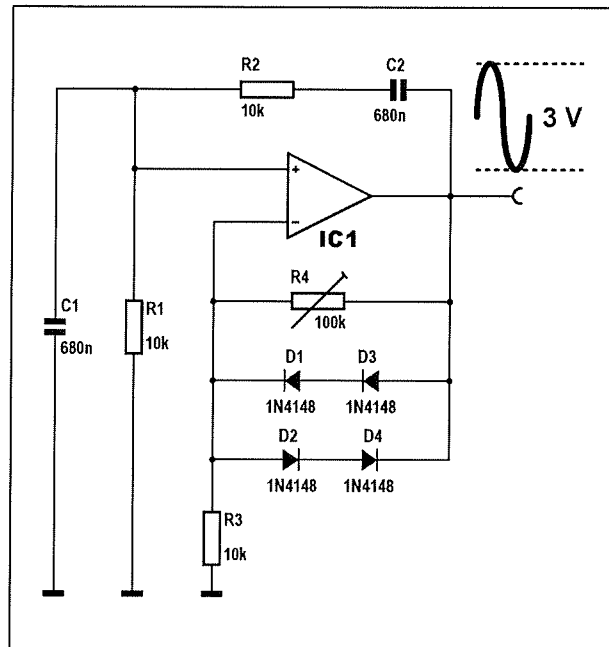
Figuur 3/97.23-5: Bij het aanleggen van een korte puls aan een nét niet oscillerende schakeling ontstaat op de uitgang een uitdovende trilling.

Automatische versterkingsregeling

Nu terug naar het opwekken van een constant uitgangsniveau. Een spanningsafhankelijke verzwakker kunnen we bijvoorbeeld opbouwen door gebruik te maken van de spanning/stroom-karakteristiek van een diode. Zoals we reeds bij twee experimenten hebben aangetoond, daalt de inwendige weerstand van een diode bij stijgende spanning over het onderdeel. Als we enige dioden opnemen in de versterkingsbepalende onderdelen van de sinusgenerator, zoals getekend in figuur 3/97.23-6, dan zal de oscillator een stabiele sinus opwekken. Door middel van de instelpotentiometer R4 kunnen we de uitgang op minimale vervorming afregelen. Met deze in wezen zeer eenvoudige schakeling kunt u sinusoscillatoren bouwen die een uitgang met ongeveer 1 % vervorming opwekken. In de praktijk is deze vervorming voor een aantal toepassingen nog onaanvaardbaar. Vandaar dat er andere, betere systemen voor automatische ver-

97.23 De op-amp als sinusgenerator

sterkingsregeling zijn ontwikkeld, die gebruik maken van FET's. Deze schakelingen leveren, in combinatie met de in dit experiment besproken sinusoscillator, sinussen met vervormingen van enige tienden procent.

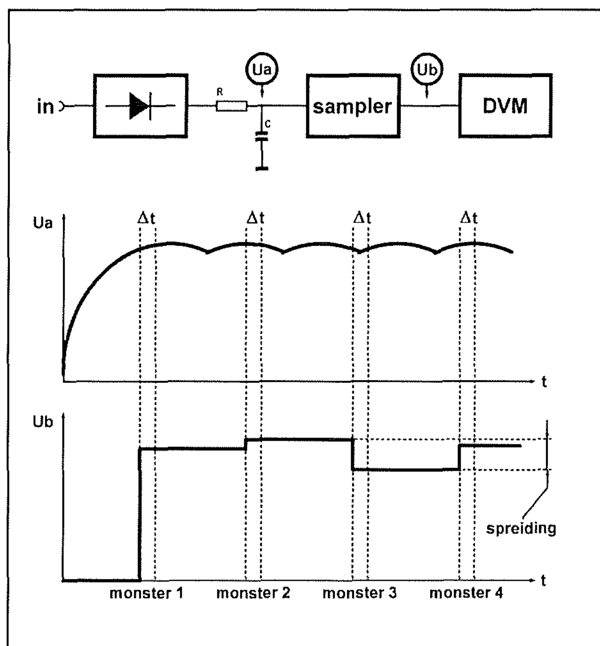


Figuur 3/97.23-6: De sinusoscillator wordt uitgebreid met dioden en wekt een mooie sinus op met een constante grootte.

3/97.24

De op-amp als anti-rimpel filter

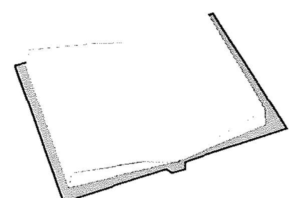
Inleiding
Als u met een digitale meter wisselspanningen wilt meten, dan kunnen er problemen ontstaan als gevolg van de rimpel die op de uitgang van de gelijkrichter staat. Een aantal digitale metersystemen werkt immers door middel van de samplemethode. Bij dit systeem, voorgesteld in figuur 3/97.24-1 , wordt er gedurende een kleine tijd Δt een monstertje van het gelijkgerichte signaal U_A genomen.



Figuur 3/97.24-1: De op de uitgang van de gelijkrichter aanwezige rimpel kan aanleiding geven tot spreiding op de uitlezing.

Door middel van een analoog naar digitaal omzetter wordt de grootte van dit monster omgezet in een aantal pulsen, dat wordt geteld door de meter die de spanning onder de vorm van een getal presenteert.
De kans is dan erg groot dat er een spreiding van tientallen millivolt ontstaat op de gemeten waarde, de twee laatste cijfers van de uitlezing gaan voortdurend variëren. Een verschijnsel, bekend onder de naam "jitter".
Dat is vrij simpel te verklaren, Monster 2 wordt genomen op het moment dat de uitgangsspanning van de gelijkrichter vrijwel maximaal is. Monster 3, echter, wordt genomen op het moment dat de uitgangsspanning minimaal is. Tussen beide metingen zit een verschil, gelijk aan de grootte van de rimpelspanning.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.8
Hoofdstuk 3/97.6

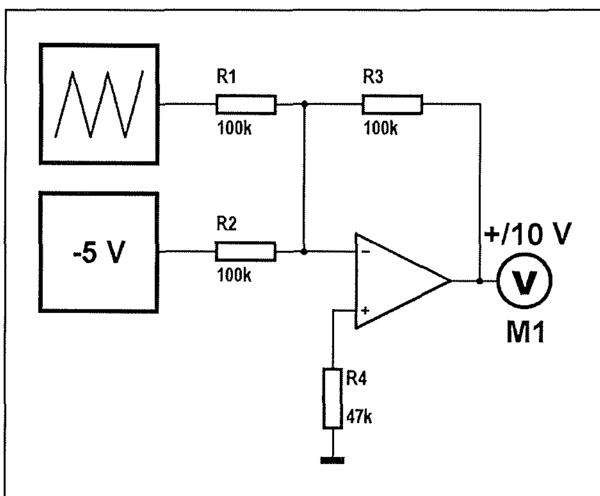


97.24 De op-amp als anti-rimpel filter

Nu kunnen we proberen de rimpel zo klein mogelijk te maken door het vergroten van de waarden van de onderdelen R en C.
De afvlakking van het gelijkgerichte signaal wordt dan beter, maar het duurt veel langer alvorens de condensator tot de topwaarde van een nieuwe ingangsspanning is gestegen of gedaald. Met andere woorden: de gelijkrichter wordt trager.

Een rimpelspanning genereren

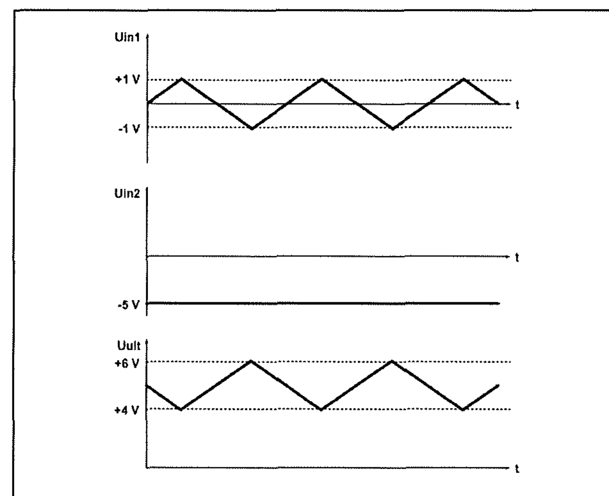
Door middel van een simpel op-amp schakelingetje kunnen we een ideaal anti-rimpel filter maken, niet geplaagd door enige traagheid van betekenis. Alvorens we echter met deze schakeling kunnen experimenteren, moeten we uiteraard eerst een gelijkspanning met rimpel opwekken. Ook dat kan met een op-amp'je, volgens het schema van figuur 3/97.24-2.



Figuur 3/97.24-2: Door middel van een mengertje simuleren we op de trainer een gelijkspanning met rimpel.

Dat is niets anders dan een inverterende mengversterker (zie hoofdstuk 3/97.6).

Eén ingang wordt aangesloten op een gelijkspanning van -5 V, de andere gaat naar de uitgang van de op driehoek geschakelde functiegenerator, met een top-tot-top waarde van 2 V. De schakeling mengt beide spanningen, zodat we op de uitgang een gelijkspanning van +5 V aantreffen, voorzien van een rimpel van 2 V, zie de grafieken van figuur 3/97.24-3. De uitgangsspanning van de schakeling varieert tussen +6 V en +4 V, hetgeen een zeer grote rimpel voorstelt. Zet de frequentie van de driehoek wel op maximale waarde!



Figuur 3/97.24-3: De in- en uitgangsspanningen van de schakeling van figuur 3/97.24-2.

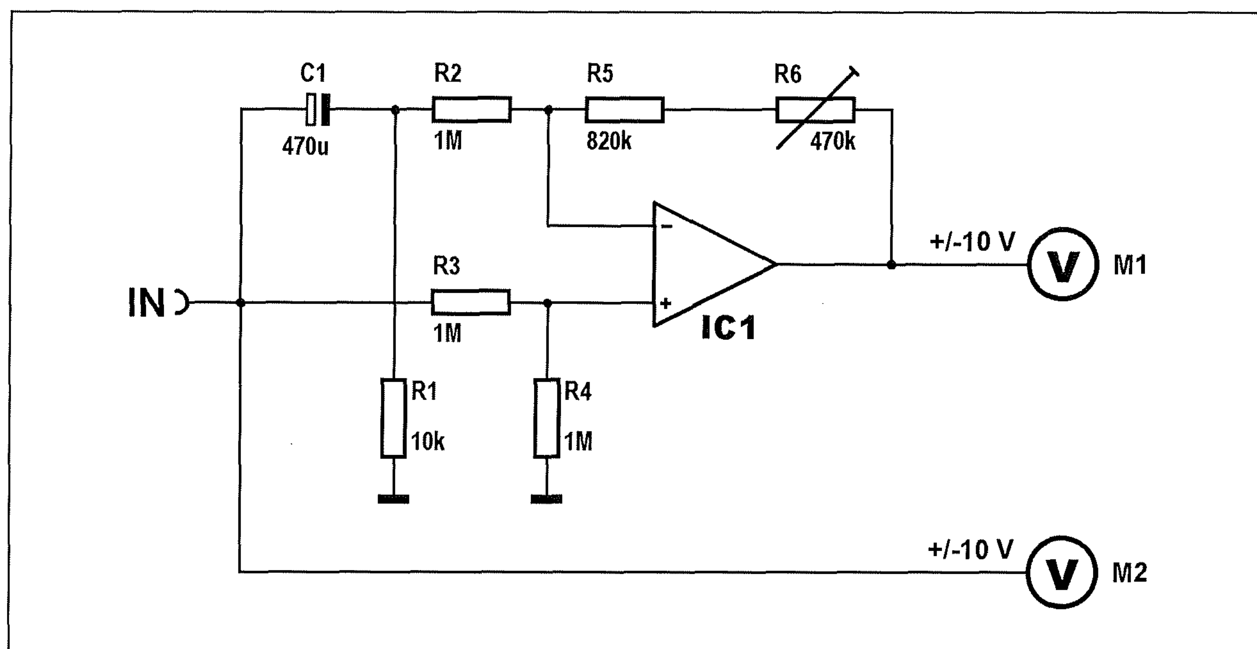
De schakeling op onze print

Aan de hand van figuur 3/97.24-4 kunt u deze eerste schakeling van dit hoofdstuk op uw experimenteerprint opbouwen.

De anti-rimpel schakeling

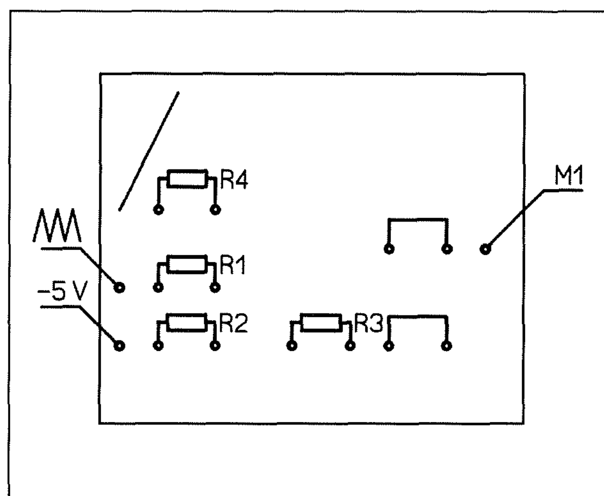
Nu de anti-rimpel schakeling. Het op de trainer op te bouwen schema is getekend in figuur 3/97.24-5. We herkennen de in experiment 3/97.7 beschreven verschilversterker: vier even grote weerstanden R3, R4, R2 en R5 + R6.

97.24 De op-amp als anti-rimpel filter



Figuur 3/97.24-5: De schakeling van het anti-rimpel filter.

Deze zijn op de voor verschilversterkers specifieke manier geschakeld rond de op-amp.

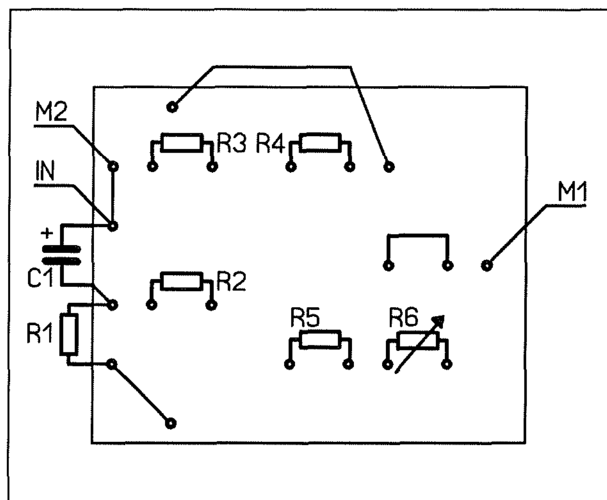


Figuur 3/97.24-4: De schakeling van de rimpelspanningsgenerator op uw experimenteerprint.

Wel twee verschilpunten: Beide ingangen worden gestuurd door één spanning en tussen de ingang en een van de ingangen van de verschilversterker staat een RC-kring. De componenten van deze RC-kring, C1 en R1, moeten zo worden berekend dat zij de rimpelspanning onverzwakt doorlaten. Omdat we bij de trainer zitten met een maximale frequentie van ongeveer 1 Hz, moet die condensator erg groot worden gekozen, 470 µF! Bij "normale" schakelingen kan de waarde van de condensator veel lager zijn.
Als tweede eis wordt gesteld dat de waarde van R1 zo klein mogelijk moet zijn, vergeleken met de weerstanden van de verschilversterker. In het voorbeeld van figuur 3/97.24-5 wordt een verhouding van 1 tot 100 aangehouden.

De anti-rimpel schakeling op uw print
In figuur 3/97.24-6 is de praktische uitvoering van deze schakeling voorgesteld. U moet weliswaar een paar onderdelen op ongebruikelijke plaatsen solderen, maar het kan wél. U kunt de ingang van deze tweede experimenteerprint verbinden met de uitgang van de eerste.

97.24 De op-amp als anti-rimpel filter



Figuur 3/97.24-6: De anti-rimpel schakeling op uw experimenteerprint.

In experiment 3/97.7 hebben we aangetoond dat de uitgangsspanning van een verschilversterker gelijk is aan $U_+ - U_-$.
Op de positieve ingang van het anti-rimpel filter staat de gelijkspanning U_{dc} en de rimpelspanning U_{ac}. Op de negatieve ingang staat alleen de rimpelspanning U_{ac}.
De uitgangsspanning van de schakeling is dan gelijk aan:

$U_{uit} = U_+ - U_-$

$U_{uit} = (U_{dc} + U_{ac}) - U_{ac}$

$U_{uit} = U_{dc}$

De rimpelspanning is verdwenen!

Werking van de schakeling

Hoe werkt deze schakeling? Simpel! De ingangsspanning is opgebouwd uit twee componenten, een gelijkspanning van +5 V en een daarop gesuperponeerde wisselspanning van 2 V top-tot-top waarde.
Deze laatste spanning verschijnt op beide ingangen van de verschilversterker. De gelijkspanning, echter, staat alleen op de positieve ingang. Het RC-netwerk spert immers iedere gelijkspanning.

Experimenteren

Sluit de uitgang van de mengversterker aan op de ingang van het filter. Vergelijk de indicaties op meter M2 (ingangsspanning) en meter M1 (uitgangsspanning). Verdraai de instelpotentiometer R6 tot de rimpelspanning uit de uitgang is gefilterd.
Varieer de grootte van de rimpel en van de gelijkspanning. De uitgang volgt (met enige traagheid, te wijten aan de grote elco) de gelijkspanning maar reageert niet op de rimpel.

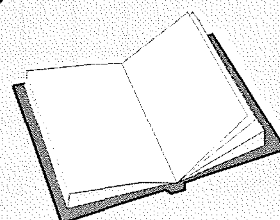
3/97.25

De op-amp als vierkantsgolf generator

Inleiding
Uit de in experiment 3/97.13 besproken functiegenerator kunnen we een vierkantsgolf aftappen. Nu zijn er, als we geen prijs stellen op ook een driehoeksuitgang, eenvoudigere schakelingen voor het opwekken van een vierkantsgolf te verzinnen.
In de meeste gevallen hebben we vierkantsgolf generatoren immers alleen maar nodig voor het sturen van digitale tellers en dan hebben we geen voordeel van het beschikbaar zijn van een driehoek.
Vandaar dat we in dit experiment de meest simpele methode bespreken voor het opwekken van een vierkantsgolf. Het schema is getekend in figuur 3/97.25-1.

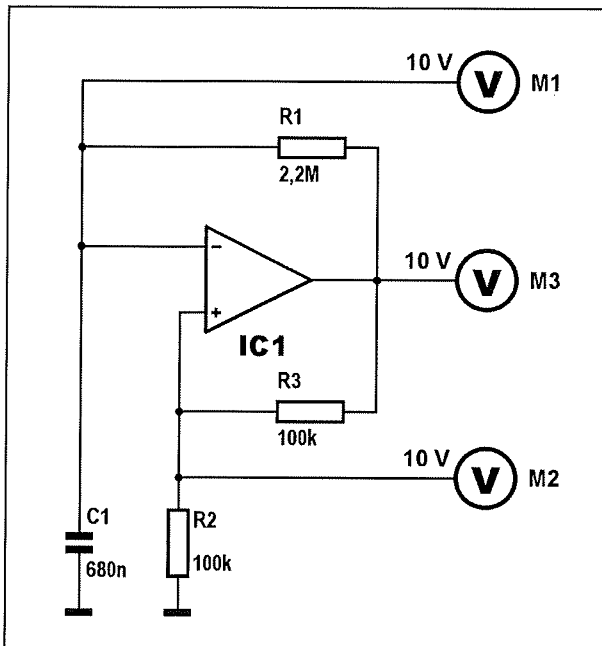
Het schema
Ook bij deze schakeling gebruiken we een dubbele terugkoppeling. Een resistieve tussen de uitgang en de positieve ingang, een RC-kring tussen de uitgang en de negatieve ingang. De werking van de schakeling volgt uit de grafieken van figuur 3/97.25-2.
Stel dat bij het inschakelen van de voedingsspanning (tijdstip t1) de uitgangsspanning van de op-amp gelijk is aan de positieve voedingsspanning. Door middel van de spanningsdeler R2-R3 zal de helft van deze uitgangsspanning op de positieve ingang terecht komen. De condensator C1 was uiteraard volledig ontladen. De negatieve ingang staat op een negatievere spanning dan de positieve ingang, de uitgangsspanning is inderdaad gelijk aan de positieve voedingsspanning.
De condensator gaat zich opladen via de weerstand R1. De spanning op de negatieve ingang stijgt dus en na een bepaalde tijd wordt deze spanning groter dan de spanning op de positieve ingang. De op-amp klapt om, de uitgangsspanning loopt vast tegen de negatieve voedingsspanning. De positieve ingang wordt ingesteld op de helft van deze spanning.
De condensator gaat nu ontladen, R1 i immers op een zeer negatieve spannin aangesloten. Na een bepaalde tijd word de spanning op de negatieve ingang klei

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.8
Hoofdstuk 3/97.6
Hoofdstuk 3/97.13

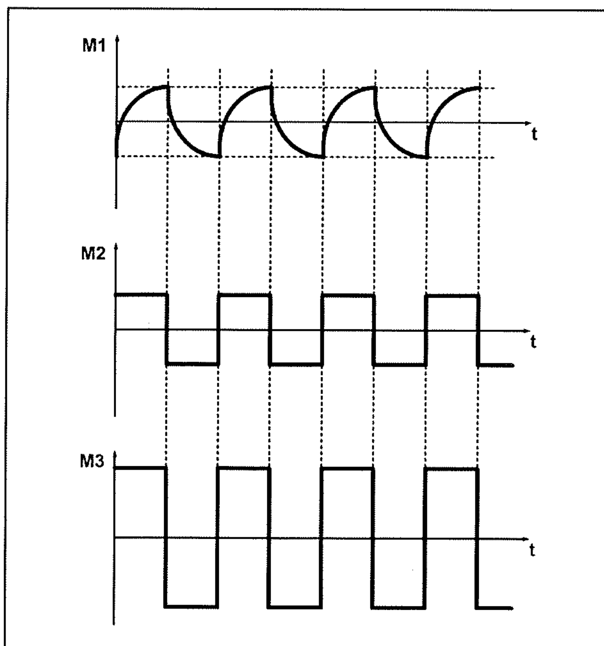


97.25 De op-amp als vierkantsgolf generator

ner dan de spanning op de positieve ingang, de op-amp klapt weer om.

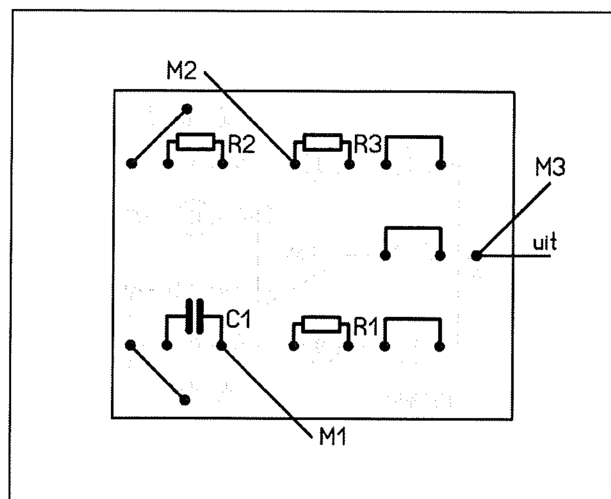


Figuur 3/97.25-1: Het basisschema van een op-amp als vierkantsgolf generator.



Figuur 3/97.25-2: De spanningen op de punten van de schakeling.

De schakeling op uw trainer
In figuur 3/97.25-3 is deze schakeling ingevuld op uw experimenteerprint. Door het variëren van de waarden van C1 en R1 kunt u de frequentie veranderen. Op de meter M3 ziet u dat door het tempo waarin de meternaald van de ene hoek naar de andere gaat.



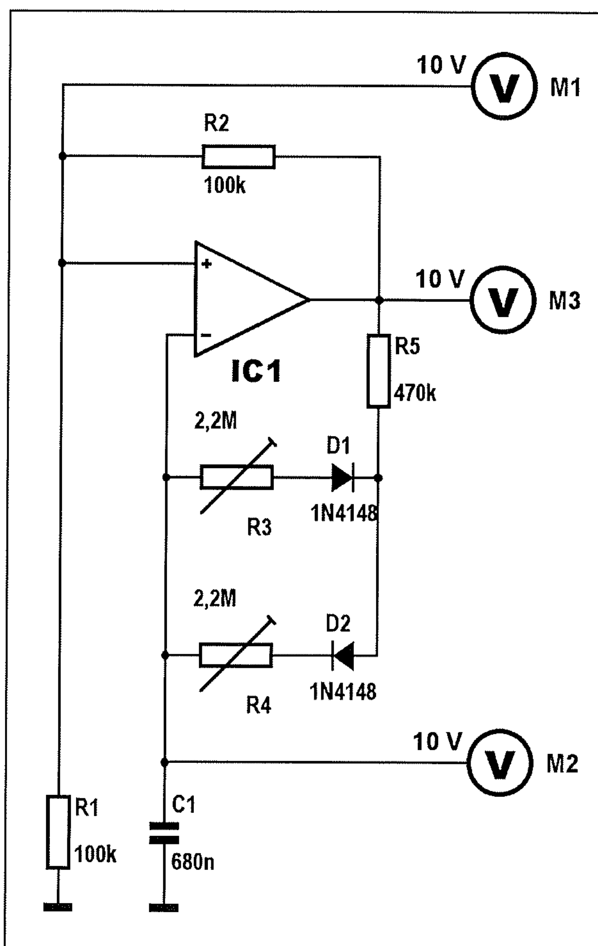
Figuur 3/97.25-3: Het schema van de vierkantsgolf generator op uw experimenteerprint.

Conclusie
Op de uitgang van de schakeling verschijnt een blokgolf, waarvan de frequentie wordt bepaald door het op- en ontladen van de condensator C1 door middel van de weerstand R1. Het volstaat dus de waarde van een van beide componenten te variëren voor het regelen van de frequentie. Meestal schakelt men de condensator om voor het kiezen van het frequentiebereik en regelt met de potentiometer R1 de frequentie in het geselecteerde bereik.

Symmetrisch of asymmetrisch?
De schakeling van figuur 3/97.25-1 wekt een ongeveer symmetrische blokgolf op. Het tijdsinterval t2-t1 is ongeveer gelijk

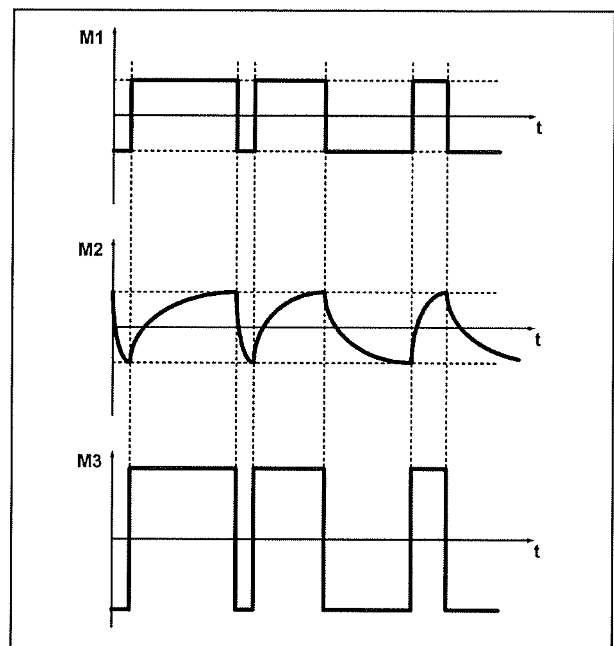
97.25 De op-amp als vierkantsgolf generator

aan het tijdsinterval t2-t3. Voor sommige toepassingen kan dat bezwaarlijk zijn. Met enige kleine uitbreidingen kunnen we de schakeling omvormen tot een pulsgenerator, die smalle positieve of negatieve pulsjes kan opwekken. Het universele schema van een pulsgenerator met een op-amp is getekend in figuur 3/97.25-4.



Figuur 3/97.25-4: Een uitbreiding van het principe tot pulsgenerator.

Door middel van twee dioden wordt het laden en ontladen van de condensator afzonderlijk geregeld door twee weerstanden R3 en R4.
Als de uitgangsspanning van de op-amp positief is, dan zal D1 sperren en D2 geleiden. Door deze laatste diode vloeit dan de laadstroom, waarvan de grootte wordt bepaald door de waarde van de weerstand R4. Als de uitgang negatief is, dan spert D2 en gaat D1 geleiden. De condensator wordt dan ontladen door de weerstand R3.
In de grafieken van figuur 3/97.25-5 zijn de spanningen op de diverse punten van de schakeling getekend voor diverse instellingen van de potentiometers. In het ene geval wekt de schakeling smalle negatieve pulsen op, in het andere geval iets bredere positieve pulsen.



Figuur 3/97.25-5: De spanningsvormen in het schema van figuur 3/97.25-4.

Besluit

Uit dit experiment blijkt dat een op-amp geïntegreerd kan worden in een digitaal systeem, opgebouwd met C-MOS schakelingen. Vaak heeft men in een digitaal systeem behoefte aan een klokoscillator en zijn alle poorten, beschikbaar in de gebruikte digitale IC's, bezet door andere functies. Het is dan vaak voordeliger

97.25 De op-amp als vierkantsgolf generator

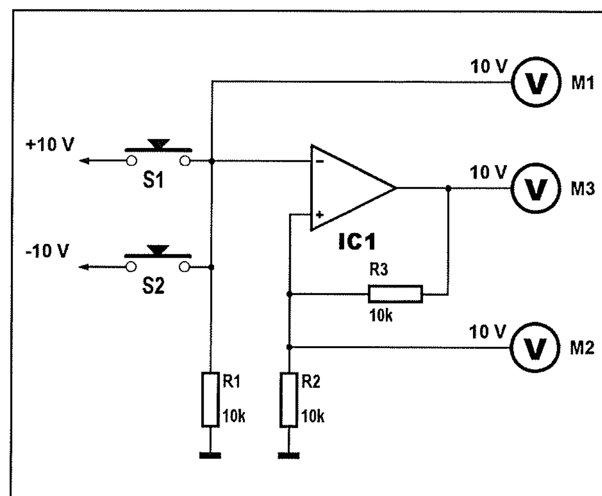
een goedkoop op-ampje toe te passen dan een nieuw digitaal IC te introduceren waarvan slechts de helft of een vierde wordt gebruikt.
Wel één waarschuwing: de normale goedkope op-amp's, zoals 741 en 3140, zijn in wezen laagfrequente schakelingen. Het is niet mogelijk met deze schakelingen pulsen op te wekken met stijgtijden van enige tientallen nanoseconden, zoals dat wel kan met digitale schakelingen.
Deze eigenschap van op-amp's beperkt de bruikbaarheid van deze schakelingen in digitale systemen.
Als u echter een of ander eenvoudig digitaal deurbelletje wilt ontwikkelen, kunt u de klokoscillator zonder meer in handen geven van een op-amp. Haal het echter niet in uw hoofd in een snelle computerschakeling op-ampjes te gebruiken!

3/97.26

De op-amp als flip-flop

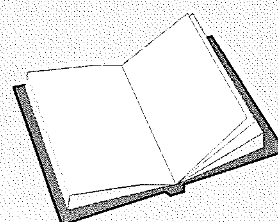
Inleiding
Flip-flop's zijn dé basisschakelingen van de digitale elektronica. Door middel van een flip-flop kunnen we het even aanwezig zijn van een spanningspiekje "bewaren". Een flip-flop is dus een elektronisch geheugen dat in staat is het verschijnen van een kortstondig pulsje om te zetten in een in principe eeuwig durende uitgangsvariatie. Er bestaan talloze goedkope digitale IC's die even veel uitvoeringen van flip-flop's herbergen. Tóch kan het soms voordeliger zijn een flip-flop op te bouwen rond een op-amp, dan beroep te doen op een van de vele digitale flip-flop IC's.
Zeker nu er talloze IC's in de handel zijn die vier identieke op-amp's bevatten doet zich vaak de praktijksituatie voor dat u een op-ampje over houdt en tezelfdertijd een flip-flop nodig heeft. Dan is het natuurlijk economischer de niet gebruikte op-amp toe te passen.

Basisschema
De basisuitvoering van de op-amp als flip-flop is getekend in figuur 3/97.26-1. De positieve ingang van de op-amp is door middel van een weerstandsdeler verbonden met de uitgang. Dezelfde opzet als bij de blokgolf oscillator! Overigens met hetzelfde doel: de spanning op de uitgang vast te leggen op één van de voedingsspanningen tot er iets gebeurt op de negatieve ingang. Dat "iets" is in dit geval het verschijnen van een smal positief of negatief pulsje.



Figuur 3/97.26-1: Het basisschema van een flip-flop met een op-amp.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.8
Hoofdstuk 3/97.6

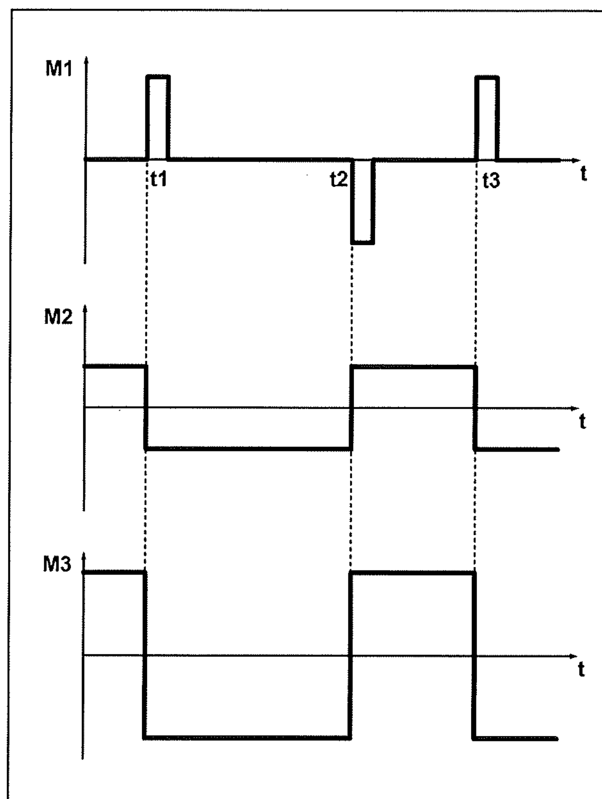


97.26 De op-amp als flip-flop

Op de trainer kunt u dit simuleren door middel van de twee pulsdrukknoppen. Een van de twee gelijkspanningsbronnen stellen we in op +10 V, de tweede op -10 V. Als we de drukknop indrukken, verbonden met de eerste spanningsbron, dan verschijnt er een puls van +10 V. Bij het indrukken van de tweede drukknop verschijnt er een puls van -10 V op de uitgang.
De gemeenschappelijke "SPRONG"-uitgang van de trainer wordt verbonden met de negatieve ingang van de op-amp. Deze ingang ligt bovendien door middel van de weerstand R1 aan de massa.

Werking van de schakeling

Stel, zoals aangegeven in figuur 3/97.26-2, dat de uitgangsspanning van de op-amp bij het inschakelen van de voedingsspanning gelijk is aan de positieve voedingsspanning. De terugkoppeling zorgt ervoor dat de positieve ingang positief wordt ten opzichte van de negatieve ingang. Deze terugkoppeling zorgt dus voor het stabiliseren van de inschakelsituatie.
Voer nu door het indrukken van S1 op uw trainer een positief pulsje toe aan de negatieve ingang. De +10 V op deze ingang is positiever dan de +5 V op de positieve ingang, de op-amp klapt om. De uitgang gaat naar -10 V en de terugkoppeling zorgt ervoor dat de positieve ingang op -5 V komt te staan. De negatieve ingang is nog steeds positiever dan de positieve ingang, deze situatie is stabiel.
Nu laten we de drukknop los. De negatieve ingang van de op-amp gaat naar massa. Maar ook nu is deze ingang nog steeds positiever dan de -5 V spanning op de niet-inverterende ingang. De uitgang blijft dus op de negatieve voedingsspanning staan!



Figuur 3/97.26-2: De spanningsvormen in de schakeling.

Conclusie

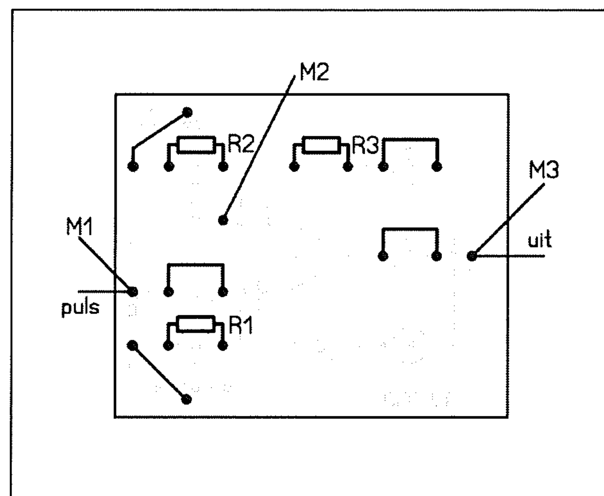
Het aanleggen van een korte positieve puls op de negatieve ingang zorgt voor het omklappen van de uitgangsspanning van +10 V naar -10 V. De schakeling werkt als geheugenelement, als flip-flop. Het zal duidelijk zijn dat we de schakeling weer in de beginstand kunnen brengen door het op de negatieve ingang aanleggen van een negatief pulsje.
Als we deze schakeling willen vatten in de terminologie van digitale schakelingen, kunnen we zeggen dat de op-amp als flip-flop voldoet aan de meest eenvoudige versie van de flip-flop: een S-R type, waarbij de set- en reset-functies op een en dezelfde ingang inwerken, maar tegengestelde polariteiten eisen.
Bij vergelijking met het groot aanbod aan digitale flip-flop's (R-S, D, J-K, etc)

97.26 De op-amp als flip-flop

heeft de op-amp dus maar beperkte gebruiksmogelijkheden.

De schakeling op uw experimenteerprint

In figuur 3/97.26-3 hebben we de flip-flop uitgewerkt op uw experimenteerprint. Probeer eens op uw tweede experimenteerprint een identieke schakeling op te bouwen en deze te sturen uit de uitgang van de eerste flip-flop!



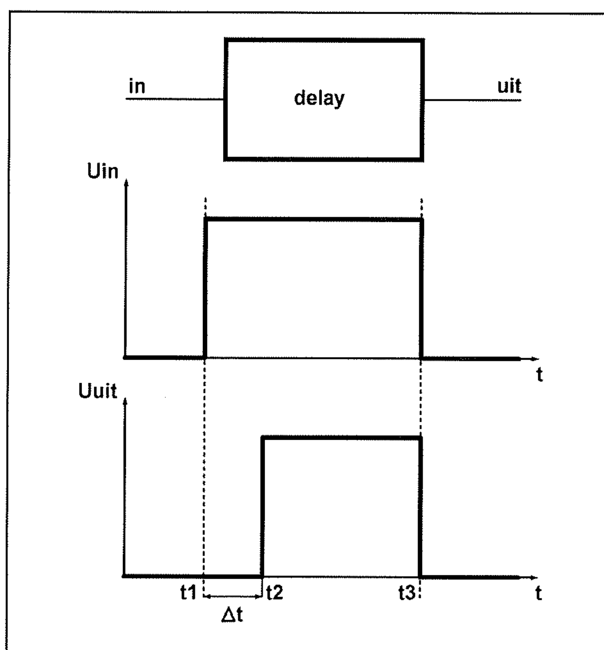
Figuur 3/97.26-3: De flip-flop op uw experimenteerprint.

97.26 De op-amp als flip-flop

3/97.27

De op-amp als vertrager

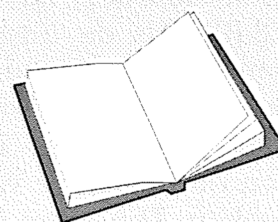
Inleiding
Vertragingen (of delay's) worden vaak toegepast in de digitale elektronica. Een voorbeeld. Een inbraakalarm heeft een activeringsknop. Drukt u die in, dan heeft u nog 20 seconden tijd om het pand te verlaten, alvorens het alarm afgaat. Deze vertraging wordt verzorgd door een delayschakeling.



Figuur 3/97.27-1: De werking van een delay: de voorflank van een puls wordt een tijd Δt vertraagd.

Er zijn diverse soorten vertragingsschakelingen. De eenvoudigste is getekend in figuur 3/97.27-1. Bij dit delay wordt alleen de voorflank van de puls met een tijd Δt vertraagd. In rust zijn in- en uitgang op massapotentiaal. Een positieve puls aan de ingang op tijdstip t1 resulteert in een vertraagde puls op tijdstip t2. Als de ingangspuls op tijdstip t3 wegvalt, dan houdt echter ook de uitgangspuls het voor gezien.
Er zijn delay's waarmee we niet alleen de voorflank, maar ook de achterflank van een puls kunnen vertragen (de pulsbreedte blijft dan constant) en er zijn zelfs schakelingen waarmee we een korte puls in de tijd kunnen opschuiven. Met andere woorden: de ingangspuls is alweer verdwenen, alvorens de delay een uitgangspuls opwekt.
Volgens de klassieke digitale methode worden dit soort schakelingen opgebouwd met geïntegreerde monostabiele

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.9
Hoofdstuk 3/97.11

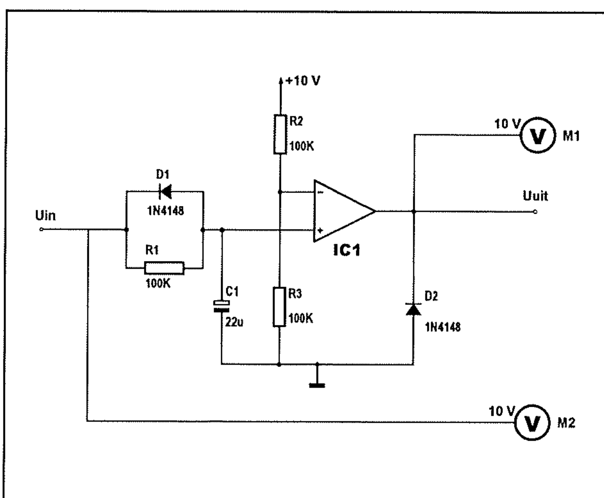


97.27 De op-amp als vertrager

multivibratoren, zoals de 74121 voor TTL of de 4047 voor CMOS. Als we geen al te hoge eisen stellen aan de schakelsnelheid (dus werken in een laagfrequente omgeving), dan kunnen we delay's net zo eenvoudig met op-ampjes opbouwen.

Een pulsvertrager volgens figuur 3/97.27-1

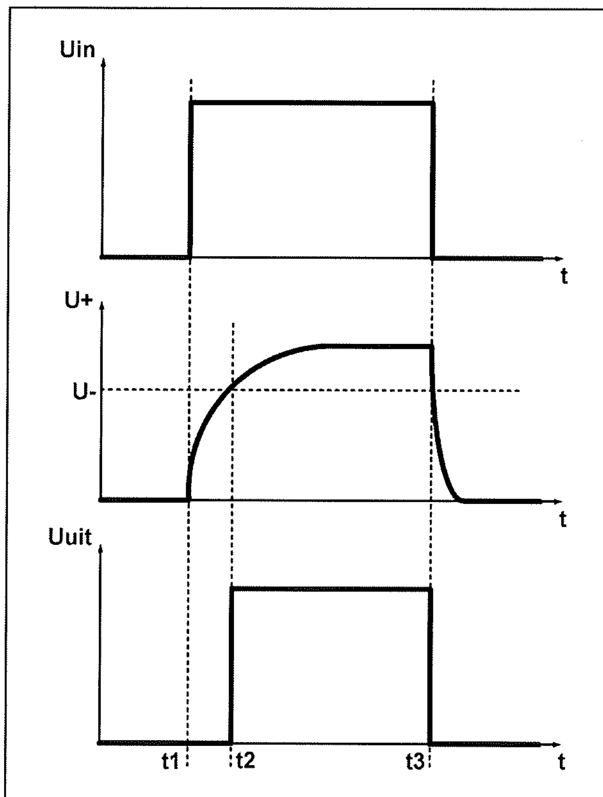
Figuur 3/97.27-2 geeft een voorbeeld van een schakeling, die de voorflank van een (positieve) puls met een instelbare tijd vertraagd.



Figuur 3/97.27-2: Een delay, samengesteld uit een RC-integrator en een comparator.

De grafieken van figuur 3/97.27-3 geven uitsluitsel over de werking. De op-amp is in feite geschakeld als comparator. De drempelspanning wordt ingesteld op de helft van de positieve voedingsspanning door middel van de spanningsdeler R2-R3. Als de ingangsspanning nul is, dan staat de negatieve input van het IC op een positievere spanning dan de niet-inverterende ingang. De uitgang zou de negatieve voedingsspanning opzoeken. Zou, want de diode D2 zorgt ervoor dat de uitgang van de op-amp niet lager kan gaan dan -0,7 V. Dit is niet noodzakelijk, maar in de digitale elektronica werken we met standaardniveau's en daarbij is het meestal de gewoonte dat een "0" (L) overeenkomt met nul volt.

Let op! Niet ieder type op-amp laat toe dat we zijn uitgang met een diode kortsluiten naar massa. De 741 kan onbegrensd worden kortgesloten, hierbij kan het dus wel.



Figuur 3/97.27-3: De grafische verklaring van de werking van de schakeling.

Werking van de schakeling

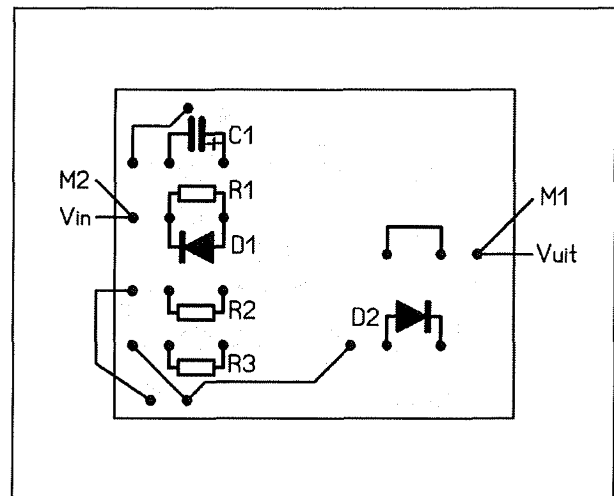
Stel dat op tijdstip t1 een positieve puls aan de ingang verschijnt. Door R1 loopt een stroom, die de condensator C1 gaat opladen. De spanning op de positieve ingang stijgt. Op tijdstip t2 wordt de

97.27 De op-amp als vertrager

spanning op deze ingang gelijk aan de drempelspanning op de inverterende ingang. De schakeling klapt om, de uitgang van de op-amp wordt positief. De tijdvertraging Δt wordt bepaald door de waarde van het RC-netwerk tussen de ingang van de schakeling en de niet-inverterende ingang van de op-amp.
Op tijdstip t3 verdwijnt de ingangspuls. De opgeladen condensator gaat nu dadelijk ontladen via de geleidende diode D1. De spanning op de +IN wordt lager dan de drempel op de -IN, de comparator klapt om. De uitgang gaat naar nul.

Experimenteren

Bouw deze schakeling op de trainer volgens figuur 3/97.27-4 en experimenteer met de schakeling: hoe kun je ook de achterflank vertragen, of hoe kun je alleen de achterflank vertragen?



Figuur 3/97.27-4: De schakeling van de delay op uw experimenteerprint.

Even een opmerking

De "digitale" puls van 0 V tot +10 V kunt u simuleren door een van de gelijkspanningspotentiometers op +10 V in te stellen en om te schakelen tussen 10 V en 1 V met de tuimelschakelaar. De spanning wipt dan heen en weer tussen +10 V en +1 V, deze laatste waarde is laag genoeg om als "L" te worden geïnterpreteerd.

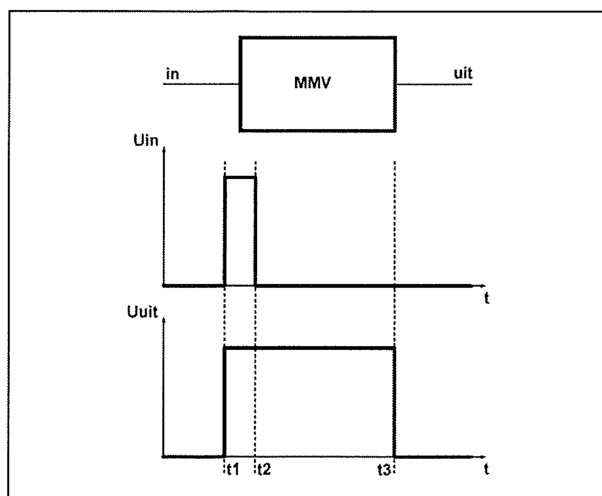
97.27 De op-amp als vertrager

3/97.28

De op-amp als monostabiele multivibrator

Inleiding

Een monostabiele multivibrator (MMV) is een schakeling, zie figuur 3/97.28-1, die op commando van een ingangspuls met willekeurige duur een uitgangspuls van constante, maar instelbare duur, opwekt. De pulsbreedte t3-t1 van de uitgangsspanning moet volledig onafhankelijk zijn van de pulsbreedte t2-t1 van de startpuls.
Als we rekening houden met de reeds bekende begrenzingen van op-amp schakelingen in digitale toepassingen (alleen bruikbaar in systemen met lage werkfrequenties), kunnen we MMV's met succes opbouwen met deze geïntegreerde versterkers.



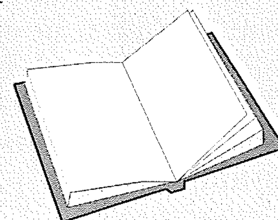
Figuur 3/97.28-1: De basiswerking van een monostabiele multivibrator.

De MMV op onze trainer

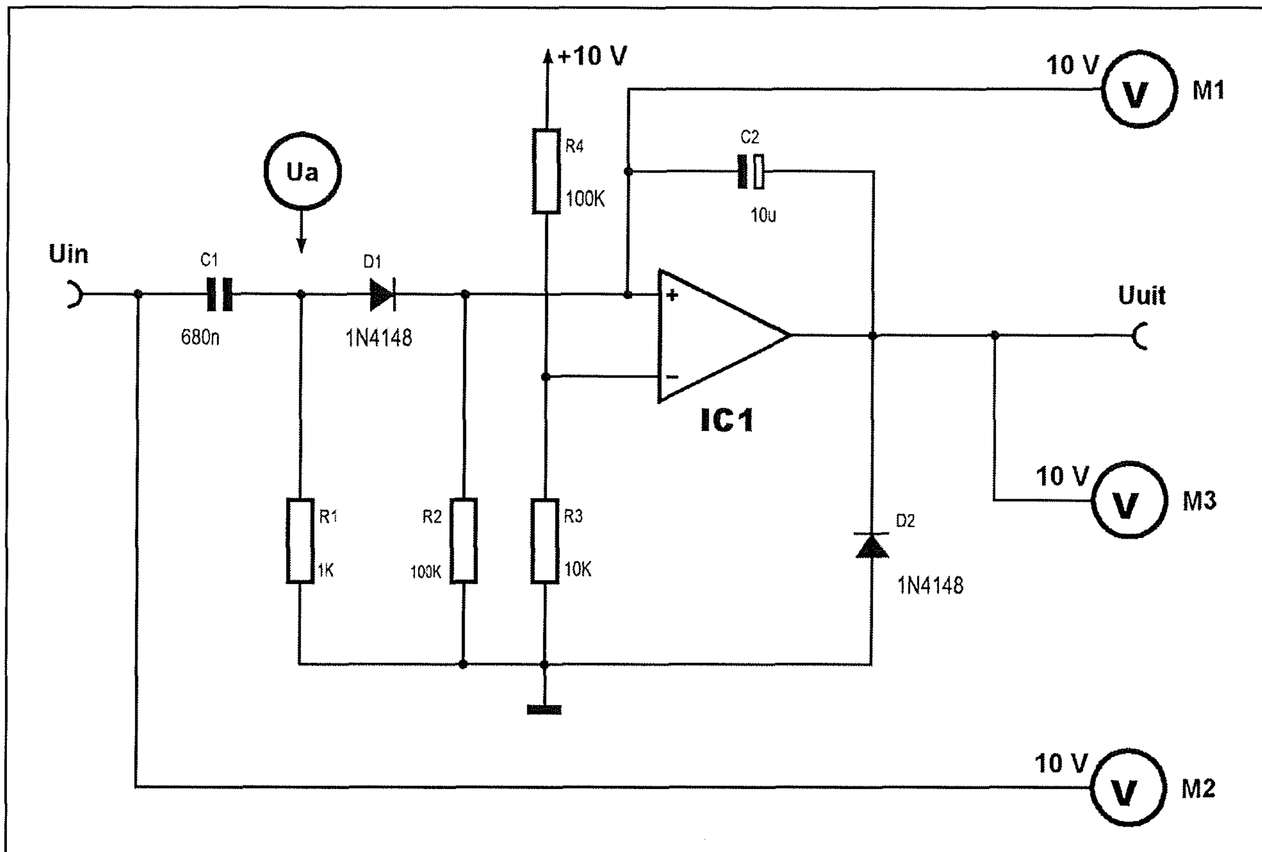
Figuur 3/97.28-2 geeft een op de trainer op te bouwen voorbeeld van een schakeling die op bevel van een smalle positieve puls een bredere positieve puls opwekt. De ingangspuls kunnen we weer simuleren door een van de gelijkspanningsbronnen van de trainer op +10 V in te stellen en de tuimelschakelaar te bedienen. Stand 1 V komt dan overeen met een logische "0", stand 10 V met een logische "1". De op-amp werkt (alweer) als comparator. De negatieve ingang is door middel van de spanningsdeler R4-R3 ingesteld op een positieve spanning van ongeveer 1 V. Dat doen we om er zeker van te zijn dat in rust, dus zonder puls aan de ingang, ook de uitgang op 0 V staat.

LEES OOK:

Hoofdstuk 3/12.9
Hoofdstuk 3/97.8
Hoofdstuk 3/97.11



97.28 De op-amp als monostabiele multivibrator



Figuur 3/97.28-2: Het basisschema van een monostabiele multivibrator.

De diode D2 aan de uitgang zorgt voor het begrenzen van de negatieve uitgangsspanning van de op-amp op -0,7 V, gelijk aan logisch “0”.

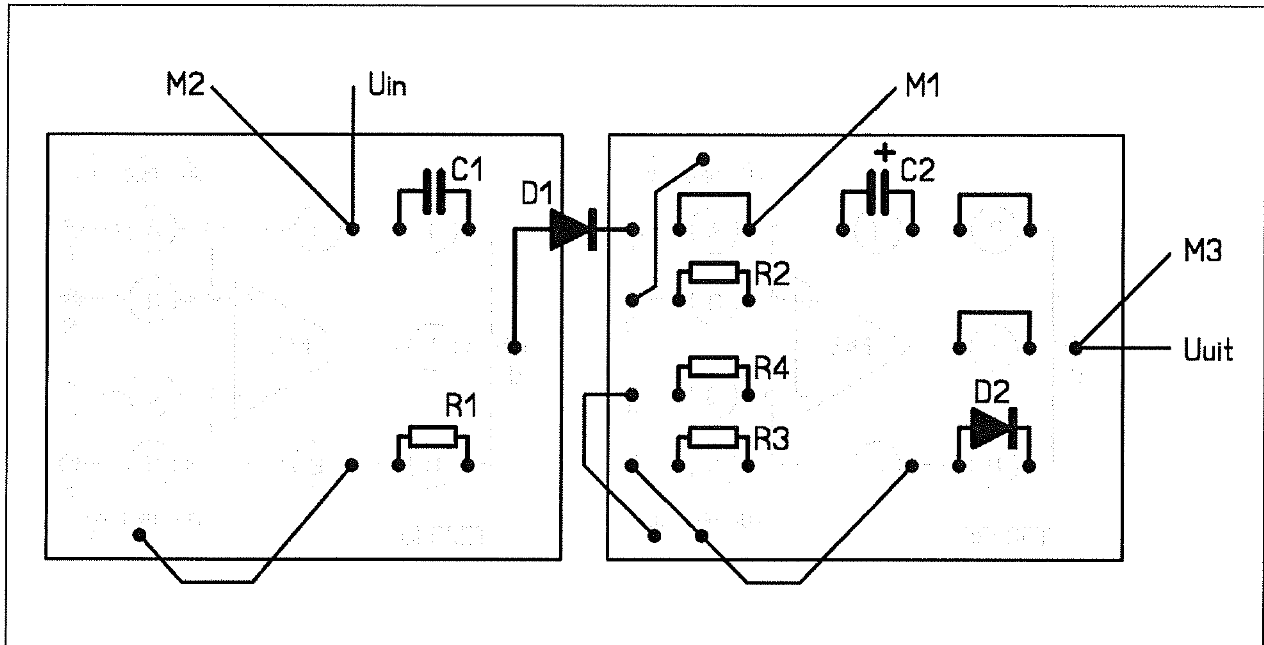
De schakeling op uw experimenteerprinten

In figuur 3/97.28-3 is de schakeling op uw experimenteerprinten voorgesteld. Omdat er aan de positieve ingang van de op-amp zoveel componenten hangen, kunt u dat niet op één printje voor elkaar krijgen. Wij schakelen dus de tweede print in, die u in een vorig experiment ook al nodig had. De linker print wordt alleen gebruikt als soldeerhulpmiddel om alle onderdelen kwijt te raken. De op-amp op deze print wordt uiteraard niet gebruikt.

Werking van de schakeling

Aan de hand van de grafieken van figuur 3/97.28-4 kunnen we de werking van de schakeling doorgronden. Op tijdstip t1 schakelen we de schakelaar op de trainer even om van 1 V naar 10 V. Er verschijnt een positieve puls aan de ingang. Deze puls wordt door het RC-netwerkje C1-R1 gedifferentieerd. Alleen de snelle voor- en achterflank worden door de condensator doorgelaten. Over de weerstand ontstaan dus twee zeer smalle naaldpulsjes, een positief pulsje bij het verschijnen van de ingangspuls en een negatief pulsje bij het verdwijnen van het signaal. Het negatief naaldpulsje zijn we liever kwijt dan rijk, vandaar de diode D1, die alleen de positieve naald doorkoppelt naar de positieve ingang van de op-amp.

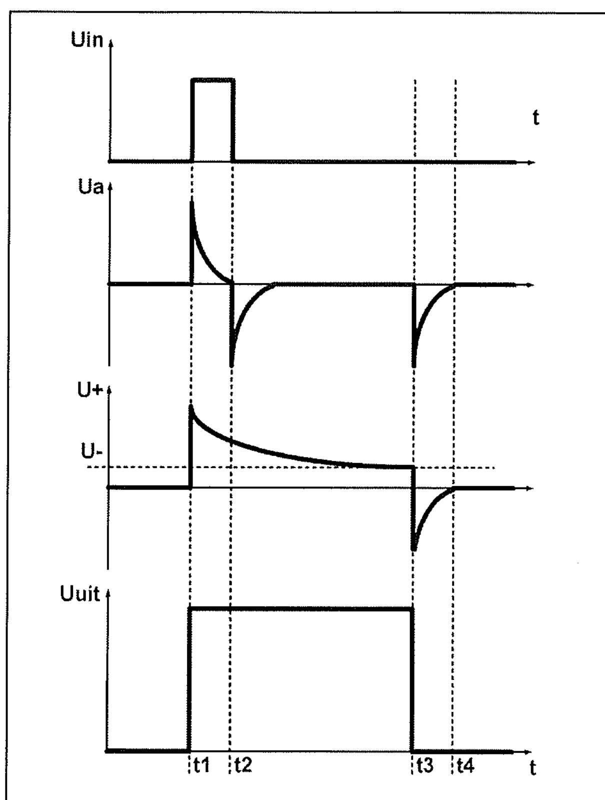
97.28 De op-amp als monostabiele multivibrator



Figuur 3/97.28-3: De MMV op uw experimenteerprinten.

Op tijdstip t1 wordt de positieve ingang dus heel even veel positiever dan de negatieve ingang. De comparator reageert dadelijk, de schakeling klapt om en de uitgang wordt positief.
Tussen de uitgang en de positieve ingang van de op-amp staat ook een differentiator geschakeld. De tijdconstante van de kring C2-R2 is echter zeer groot. De positieve flank van de uitgang wordt doorgekoppeld naar de positieve ingang. Door de grote tijdconstante van de kring gaat de elco zeer langzaam ontladen via R2.
Gevolg: ook na het wegvallen van het smalle naaldpulsje, afgeleid van de ingang, blijft de positieve ingang van de op-amp positief.
Ook de spanning op de uitgang van de schakeling blijft dus op logisch "1" staan.
De condensator C2 gaat nu ontladen. De spanning op de positieve ingang daalt en na een bepaalde tijd wordt deze spanning gelijk aan de +1 V op de negatieve ingang. De comparator klapt om, de uitgang gaat naar nul (tijdstip t3). Ook deze negatieve sprong wordt door de elco doorgekoppeld naar de positieve ingang. De spanning op dit punt gaat dus opeens naar -9 V. Deze spanning moeten we zo snel mogelijk zien kwijt te raken. Immers, zou dit potentiaal zich even traag afbouwen (via het ontladen van C2 door R2) als de positieve spanning na t1, dan zou het een hele tijd duren alvorens de schakeling reageert op een nieuwe ingangspuls. De korte positieve naaldpuls, afgeleid van deze nieuwe ingangspuls, zou dan verdrinken in de hoge negatieve spanning op de positieve ingang van de op-amp en de schakeling zou geen uitgangspuls opwekken.
Gelukkig gaat D1 nu geleiden, want de kathode is negatief ten opzichte van de anode. De negatieve spanning op de positieve ingang van de op-amp vloeit dus zeer snel af via D1 en R1.
Vandaar op tijdstip t3 een smal negatief pulsje op Ua. Het is dus van belang de waarde van R1 zo laag mogelijk te kie-

zen. Op tijdstip t4 is de condensator ontladen, de schakeling is in rust en bereid een nieuwe monostabiele puls op te wekken.

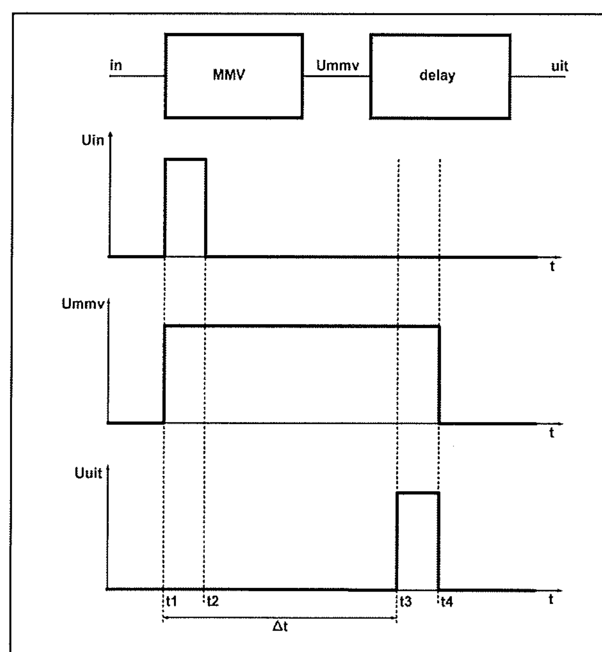


Figuur 3/97.28-4: De grafische verklaring van de werking van de schakeling.

Een toepassing van een MMV

Een toepassing van de combinatie MMV-delay geeft figuur 3/97.28-5. Een korte positieve ingangspuls moet een bepaalde tijd vertraagd worden. De vertragingstijd is groter dan de duur van de ingangspuls.

Door middel van de in dit experiment beschreven MMV zetten we de ingangspuls om in een bredere puls. Nadien gaan we de voorflank van deze puls vertragen met de in het vorige experiment beschreven delay-schakeling. Door de juiste keuze van de tijdbepalende onderdelen kunnen we er voor zorgen dat de vertraagde puls net zo breed is als de oorspronkelijke puls.



Figuur 3/97.28-5: Met de combinatie MMV plus delay kunt u een ingangspuls "in de tijd verschuiven".

3/97.29

De op-amp als poort

Inleiding
Poorten zijn dé basisschakelingen van de digitale techniek. Wie heeft er nog nooit met een NAND-je of een OR-tje gewerkt? IC's als de 7400 of de 4011 zijn voor geen enkele elektronicus onbekend. Er zijn vier basispoorten, AND, NAND, OR en NOR. De waarheidstabel in figuur 3/97.29-1 geeft het verband tussen de twee ingangsgrootheden en de uitgang van iedere poort.

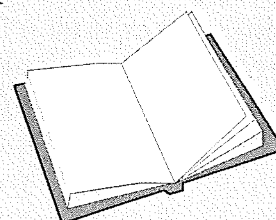
ingangen		uitgang			
A	B	AND	NAND	OR	NOR
L	L	L	H	L	H
H	L	L	H	H	L
L	H	L	H	H	L
H	H	H	L	H	L
symbool		&	&	≥1	≥1

Figuur 3/97.29-1: De waarheidstabel van de vier basispoorten van de digitale techniek.

Alle vier de poorten kunnen met op-amp's worden opgebouwd. En dat wel met één basisschakeling! Als u dus in een of ander systeem diverse soorten poorten door elkaar moet gebruiken, kan het voordelig zijn een beroep te doen op op-amp's. Weliswaar kunnen we ook met NAND's of NOR's alle basispoorten opbouwen, maar dat vereist meestal een groot aantal poorten.
Uiteraard geldt bij het gebruik van op-amp's de bekende begrenzing: niet bruikbaar in systemen die met hogere frequenties dan 10 kHz werken.
Vaak treffen we in bijvoorbeeld een inbraakalarm systeem een brokje logica aan, opgebouwd uit een aantal poorten. In zo'n traag systeem kunnen we zonder meer op-amp's toepassen als dat voordelig uitkomt.

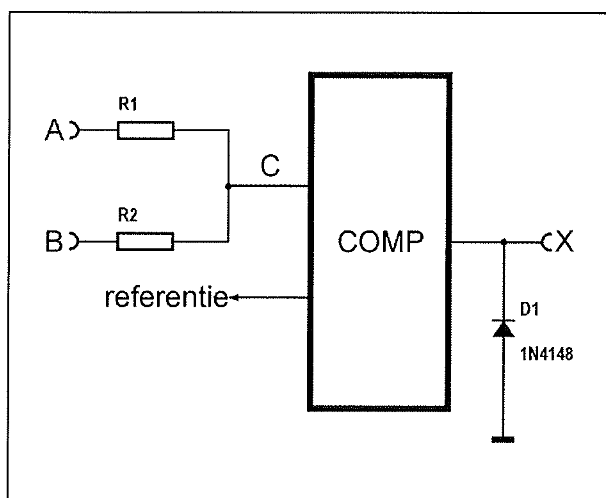
Het principe
Het basisschema van een op-amp poort bestaat uit een spanningsdeler en een comparator. In figuur 3/97.29-2 is de

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.9
Hoofdstuk 3/97.8
Hoofdstuk 3/97.11



97.29 De op-amp als poort

spanningsdeler R1-R2 getekend. De twee ingangen A en B zijn verbonden met de twee ingangssignalen. Het knooppunt van beide weerstanden (C) gaat naar de ingang van de als comparator geschakelde op-amp. De tweede ingang van de comparator wordt aangesloten op een referentiespanning.

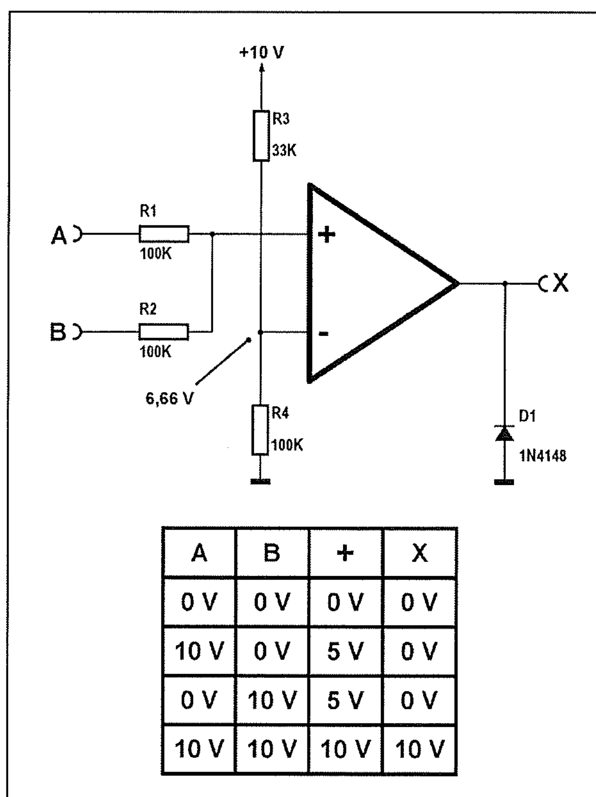


Figuur 3/97.29-2: Het principe van de op-amp als digitale poort.

Hoe werkt een en ander? De spanning die we op punt C meten zegt ons iets over de binaire combinatie van "H" en "L" op de beide ingangen. Het zal duidelijk zijn dat C "L" is als A en B "L" zijn. Het niveau "L" komt immers overeen met 0 V en 0 V op A en B levert 0 V op het knooppunt van beide weerstanden.
Als één van beide ingangen "H" is, dan staat er op punt C een spanning van +5 V. Er wordt dan immers een spanningsdeler gevormd tussen 0 V en +10 V en daar beide weerstanden even groot zijn staat er tussen beide weerstanden de helft van de spanning.
Als beide ingangen "H" zijn, dan staat er uiteraard +10 V op C.
Op punt C staat dus 0 V, +5 V of +10 V, afhankelijk van de logische combinatie op de twee ingangen. De comparator zorgt ervoor dat we deze informatie omzetten naar een eenduidige "L" of "H" op de uitgang, afhankelijk van de gewenste poortschakeling. De diode aan de uitgang van de comparator zorgt er weer voor dat de spanning op de uitgang niet lager kan worden dan -0,7 V.
Op deze wel zeer eenvoudige manier kunnen we de vier basispoorten met één op-amp uitvoeren.

De AND-poort

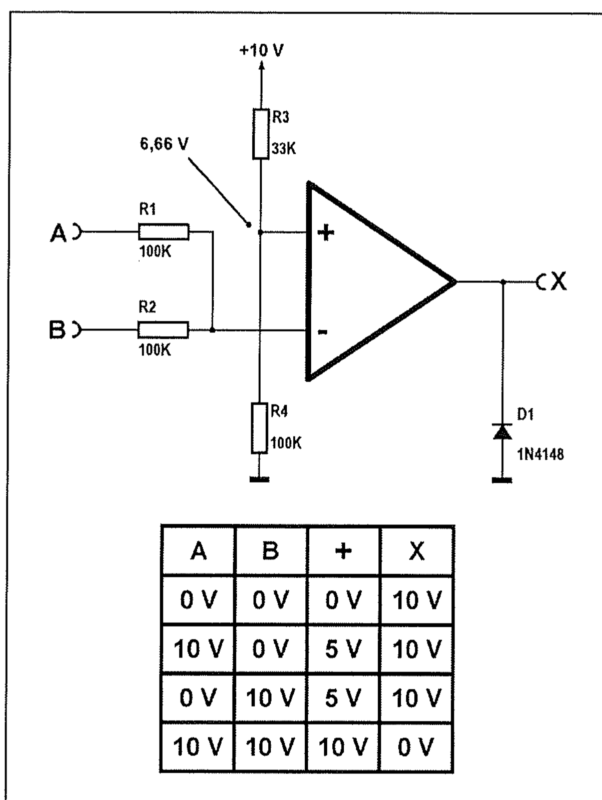
Het schema van de AND-poort is gegeven in figuur 3/97.29-3. De twee ingangen gaan via de spanningsdeler weerstanden naar de positieve ingang van de op-amp, de negatieve ingang is aangesloten op een drempelspanning van +6,66 V via de spanningsdeler R3-R4.



A	B	+	X
0 V	0 V	0 V	0 V
10 V	0 V	5 V	0 V
0 V	10 V	5 V	0 V
10 V	10 V	10 V	10 V

Figuur 3/97.29-3: Het schema van een AND met een op-amp.

97.29 De op-amp als poort



A	B	+	X
0 V	0 V	0 V	10 V
10 V	0 V	5 V	10 V
0 V	10 V	5 V	10 V
10 V	10 V	10 V	0 V

Figuur 3/97.29-4: Het schema van een NAND met een op-amp.

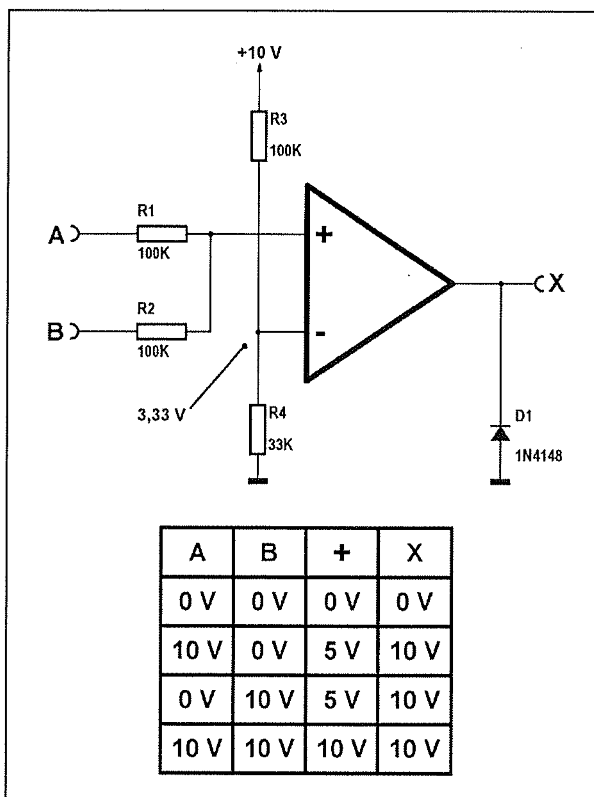
Als beide ingangen "L" zijn, dan staat op de positieve ingang een spanning van 0 V. De spanning op de negatieve ingang is groter, de uitgang van de comparator is -0,7 V, dus logisch "L". Is een van de ingangen "H", dan wordt de positieve ingang ingesteld op een spanning van +5 V, hetgeen niets aan de situatie wijzigt. Slechts als beide ingangen "H" zijn, wordt de spanning op de positieve ingang groter dan de spanning op de negatieve ingang en slaat de comparator om. De uitgang wordt +10 V, oftewel logisch "H". De schakeling voldoet aan de waarheidstabel van een AND-poort.

De NAND-poort

Het schema van de NAND staat in figuur 3/97.29-4. Het enige verschil is dat beide ingangen zijn omgewisseld. De positieve ingang van de comparator staat op een drempel van +6,66 V. Zolang niet beide ingangen "H" zijn, is de spanning op de negatieve ingang kleiner dan de drempel, de uitgang is "H". Eerst als beide ingangen "H" worden, slaat de comparator om. De waarheidstabel verwijst dus naar de NAND-functie.

De OR-poort

De OR-poort, waarvan het schema is getekend in figuur 3/97.29-5, is al net zo simpel. Beide ingangen gaan naar de positieve ingang, de negatieve is ingesteld op een drempel van +3,33 V. Nu is het voldoende dat er op één van de beide ingangen een "H" verschijnt om de comparator te laten omklappen. Hetgeen zeer duidelijk de OR-functie demonstreert.



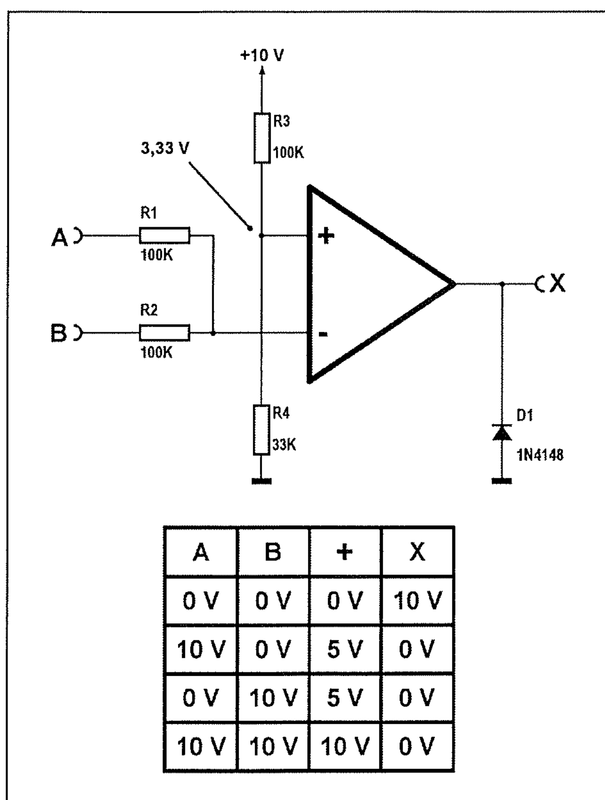
A	B	+	X
0 V	0 V	0 V	0 V
10 V	0 V	5 V	10 V
0 V	10 V	5 V	10 V
10 V	10 V	10 V	10 V

Figuur 3/97.29-5: Het schema van een OR met een op-amp.

97.29 De op-amp als poort

De NOR-poort

Het zal geen verbazing wekken dat het enige verschil tussen de OR en de NOR van figuur 3/97.29-6 de wisseling is van beide ingangen. Alleen als beide ingangen "L" zijn, staat er op de negatieve ingang een lagere spanning dan op de positieve ingang. De uitgang is dan "H" en zoekt het "L"-niveau op als een of beide ingangen "H" worden. Een typisch NOR gedrag!



A	B	+	X
0 V	0 V	0 V	10 V
10 V	0 V	5 V	0 V
0 V	10 V	5 V	0 V
10 V	10 V	10 V	0 V

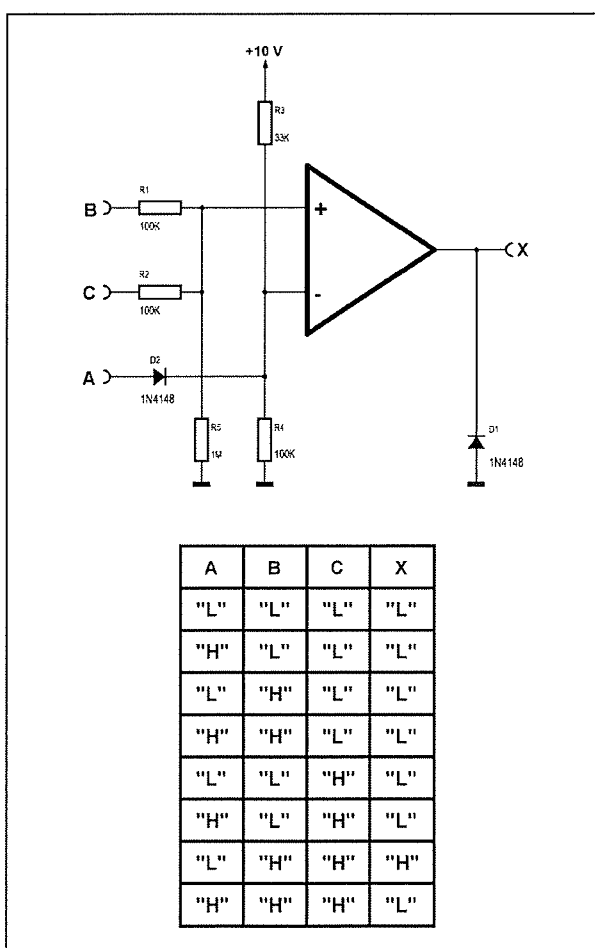
Figuur 3/97.29-6: Het schema van een NOR met een op-amp.

Conclusie

Met vier weerstanden en één op-amp heeft u een basisschakeling waarmee u alle basis poortfuncties kunt uitwerken. Als u dus een 3 x 4 standen schakelaar toevoegt, waarmee u de ingangen wisselt en de referentiespanning omschakelt van +3,33 V naar +6,66 V, heeft u een zeer eenvoudige logische demonstrator, waarmee u alle poortfuncties kunt uitproberen. Aap dat maar eens na met TTL- of CMOS-poorten!

Ingewikkelder schakelingen

Figuur 3/97.29-7, tenslotte, geeft een op-amp poortschakeling met drie ingangen A, B en C. De uitgang X mag alleen "H" worden als A = "L" en B en C = "H". Een typische decodeerschakeling, waar een op-amp zijn (of haar?) hand niet voor omdraait!



A	B	C	X
"L"	"L"	"L"	"L"
"H"	"L"	"L"	"L"
"L"	"H"	"L"	"L"
"H"	"H"	"L"	"L"
"L"	"L"	"H"	"L"
"H"	"L"	"H"	"L"
"L"	"H"	"H"	"H"
"H"	"H"	"H"	"L"

Figuur 3/97.29-7: Ook ingewikkelder decodeerschakelingen kunt u vaak zeer eenvoudig met een op-amp'je uitwerken.

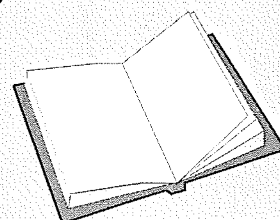
3/97.30

De op-amp als tiptoets

Inleiding
Met het dalen van de prijzen van elektronische onderdelen worden steeds vaker oude mechanische componenten, zoals relais en schakelaars, vervangen door vol-elektronische systemen. Een typisch voorbeeldje is de drukknop schakelaar. In steeds meer apparatuur treft u elektronische tiptoetsen aan, niet alleen omdat dit een modetrend is, maar wel degelijk ook omdat het goedkoper en betrouwbaarder is.
Een tiptoets wordt meestal uitgevoerd met een of meerdere CMOS-poorten. De zeer hoge ingangsimpedantie van die dingen is ideaal voor dit gebruik. Er zijn twee systemen. De minst volmaakte werkt op de huidweerstand van een vinger. Als we met de vingertop contact maken tussen twee elektroden, dan wordt er een weerstandje van een paar MΩ opgebouwd en die weerstand kunnen we gebruiken voor het opwekken van een spanninkje. De nadelen zijn evident: de contacten kunnen vervuilen door huidsmeer en andere viezigheid en het contact werkt niet betrouwbaar meer. Het betere systeem maakt gebruik van de in ieder menselijk lichaam aanwezige 50 Hz inductiespanning, opgepikt uit het alom aanwezig magnetisch veld van de netspanningsbedrading. Als we met een vingertop een geleider aanraken die een zeer hoge weerstand heeft ten opzichte van de massa, dan wordt er in die geleider een 50 Hz wisselspanning opgebouwd van wel enige tientallen volt. Die spanning kunnen we gebruiken voor het sturen van een tiptoetsschakeling. Operationele versterkers hebben ook een zeer hoge ingangsimpedantie. Het ligt dus voor de hand aan te nemen dat zij ideaal zijn voor het opbouwen van tiptoetsen.

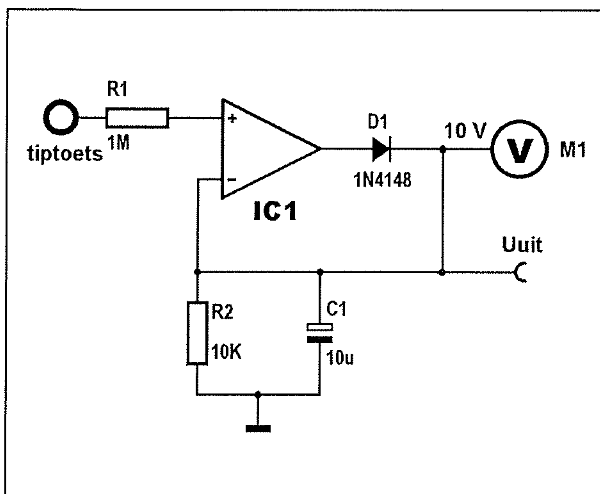
Het schema
Dat klopt, kijk maar naar figuur 3/97.30-1. We herkennen het basisschema van de topdetector uit hoofdstuk 3/97.20. De tiptoets (u kunt bijvoorbeeld een messing sierspijker met ronde kop gebruiken) gaat via een beveiligingsweerstand van 1 MΩ naar de positieve ingang van de op-amp. Tussen de uit-

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/12.8
Hoofdstuk 3/97.17
Hoofdstuk 3/97.20

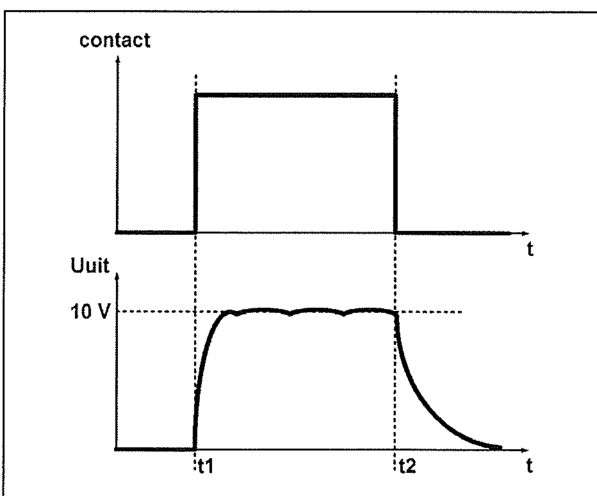


97.30 De op-amp als tiptoets

gang en de inverterende ingang staat het reeds bekende topdetectie circuit.
Als we de spijker aanraken, dan verschijnt er op de positieve ingang van de op-amp een 50 Hz wisselspanning van ongeveer 10 V. Deze spanning wordt gelijkgericht en op de uitgang verschijnt een positieve puls van +10 V. Deze is zonder meer geschikt voor het aansturen van andere schakelingen.
In figuur 3/97.30-2 is de werking van de schakeling grafisch toegelicht.



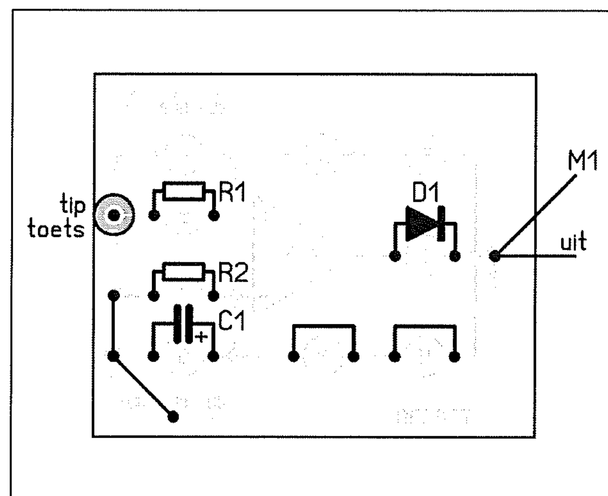
Figuur 3/97.30-1: Het schema van de tiptoets met een op-amp.



Figuur 3/97.30-2: De spanningen in de schakeling.

De tiptoets op uw trainer

In figuur 3/97.30-3 is het schema van de tiptoets uitgewerkt naar de bedrading op uw experimenteerprint. Kan het nog eenvoudiger?



Figuur 3/97.30-3: De tiptoets op uw experimenteerprint.

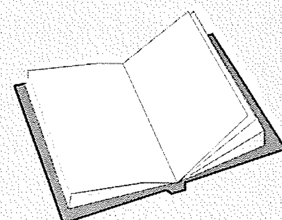
3/97.31

Geen einde, maar hopelijk een begin!

Dertig experimenten
In dertig experimenten hebben we een groot aantal toepassingen van operationele versterkers belicht, die niet allemaal dadelijk voor de hand liggen. Wij hopen dat u en zeker de experimenteerder onder u er net zoveel plezier aan heeft beleefd als de auteur.
Een belangrijk toepassingsgebied van de op-amp is niet behandeld: filters. Laagdoorlaat filters, hoogdoorlaat filters, sper filters, band filters, anti-alias filters, de moderne analoge elektronica barst van de filtertoepassingen waarvoor steeds operationele versterkers worden gebruikt. De mogelijkheden van de universele analoge trainer, met zijn zeer lage frequentie generator, laten echter niet toe dit soort schakelingen op te bouwen en te testen.
Tot besluit enige opmerkingen. De op de trainer opgebouwde schakelingen zijn aangepast aan het frequentiebereik van het apparaat. Vaak zal het noodzakelijk zijn weerstanden en condensatoren heel anders te berekenen als u een schakeling "in het veld" gaan toepassen. We hopen echter dat wij u met deze reeks experimenten een goede basis hebben gegeven voor het zonder angst zélf experimenteren met schakelingen. Een functiegenerator en een scoop zijn dan echter wel zeer noodzakelijk!

Hoe nu verder?
Moet uw dure universele analoge trainer nu worden bijgezet in de "lijkenkist"? Zeer zeker niet, het apparaat heet niet voor niets "universeel"! Tot onze verbazing hebben wij het apparaat zeer vaak gebruikt bij het normale laboratoriumwerk. Hoe vaak gebeurt het immers niet dat we even snel een instelbaar gelijkspanninkje nodig hebben voor het sturen van een schakeling. Het even aansluiten van de analoge trainer is dan simpeler dan met behulp van spanningsdelertjes, aangesloten op de laboratoriumvoeding, de nodige stuurspanning opwekken.
Ook de drievoudige spanningsmeetmogelijkheid is al vaak van pas gekomen, zeker vanwege de analoge uitlezing die vaak handiger is dan de digitale van de moderne meters.

LEES OOK:
Hoofdstuk 4/7.43



97.31 Geen einde, maar hopelijk een begin!

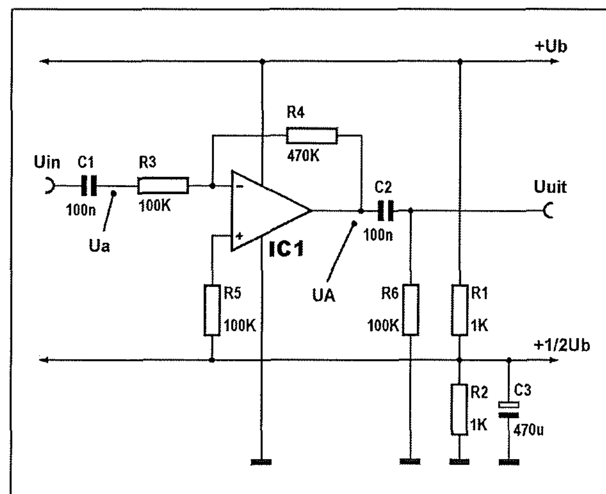
Andere schakelingen leren kennen

En vergeet niet dat er een heleboel analoge IC's zijn die met de trainer uitgetest kunnen worden. Een typisch voorbeeldje. Er bestaan OTA's (operational transconductance amplifiers), die bijvoorbeeld bij spanningsgestuurde versterkers, oscillatoren en filters worden toegepast. Het bouwen van de analoge trainer was voor de redactie de aanleiding dit soort schakelingen eens echt helemaal te gaan onderzoeken.
Wie de trainer heeft gebouwd, heeft steeds een analoge IC-tester binnen handbereik! Het volstaat immers voor de betreffende schakeling een experimenteerprintje te ontwerpen, net zoals we dat gedaan hebben voor de 741.
Schakelingen die u al experimenterend kunt leren liefhebben zijn bijvoorbeeld:
- OTA's;
- logaritmische versterkers;
- vierquadrant vermenigvuldigers;
- true RMS omvormers;
- vensterdiscriminatoren;
- begrenzers;
- expanders.

Kortom, met eigen initiatief en experimenteerdrift kunt u nog jaren lang plezier hebben van uw apparaat.

Naar asymmetrische voeding

Alle opgebouwde schakelingen zijn symmetrisch gevoed: een positieve voedingsspanning van +10 V en een negatieve voeding van -10 V. Vaak heeft u in de praktijk echter de beschikking over slechts één positieve voedingsspanning. De meeste besproken schakelingen kunnen zonder meer omgebouwd worden naar een enkele voeding. Een voorbeeld geeft figuur 3/97.31-1, een inverterende versterker. De negatieve voedingsaansluiting van het IC wordt verbonden met de massa, de positieve gaat naar de beschikbare +Ub. Door middel van een spanningsdeler R1-R2, twee even grote weerstanden, wekken we een hulpspanning op die gelijk is aan de helft van de beschikbare voedingsspanning. Dit wordt dan de nieuwe "massa" van het systeem, ook wel "virtuele" massa genoemd. Het lijkt dan alsof we de +Ub hebben opgesplitst in twee even grote deelspanningen. Als +1/2Ub gelijk wordt gesteld aan 0 V, dan is de "massa" gelijk aan -1/2Ub en +Ub gelijk aan +1/2Ub. De symmetrische toestand is hersteld. Alle onderdelen die in de behandelde schema's naar de massa gaan, moeten nu worden verbonden met het nieuw gecreeerde virtuele massapotentiaal.

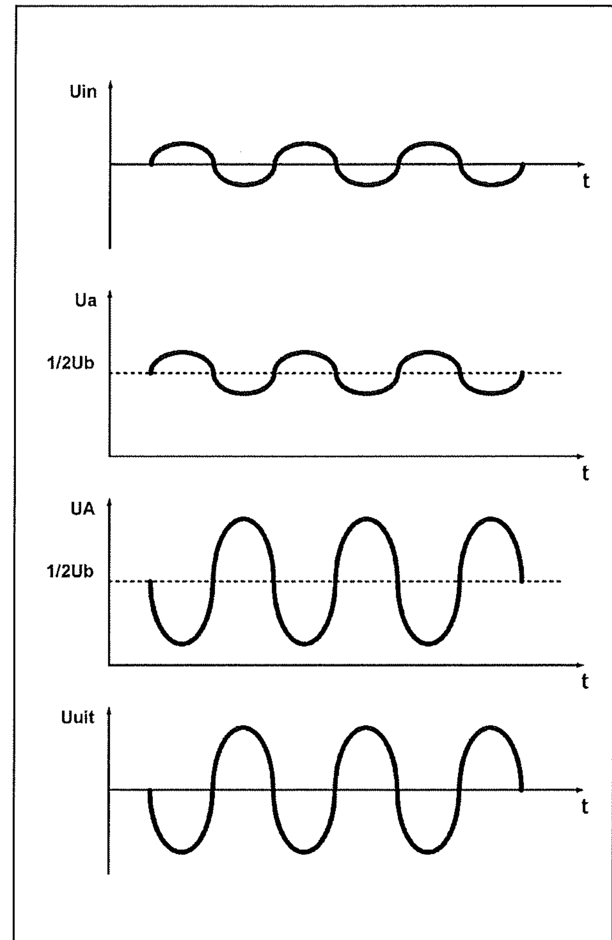


Figuur 3/97.31-1: Een voorbeeld van het gebruik van een op-amp als maar één positieve voedingsspanning ter beschikking staat.

Aan de hand van figuur 3/97.31-2 kunnen we de werking van de schakeling doorgronden. De positieve ingang van de op-amp is verbonden met +1/2Ub en deze spanning zullen we, zonder signaal aan de ingang, ook terugvinden op de

97.31 Geen einde, maar hopelijk een begin!

negatieve ingang en de uitgang. Deze instelspanning kan immers, door het gebruik van een scheidingscondensator C1, niet afvloeien en de op-amp werkt als spanningsvolger voor gelijkspanningen. Een wisselspanning op de ingang wordt echter door C1 doorgekoppeld naar de negatieve ingang. De spanning op punt A zal gaan variëren rond de instelspanning. Door R3 gaat dus een wisselstroom vloeien. De op-amp houdt de spanning op de negatieve ingang gelijk aan die op de positieve ingang. De stroom door R3 vloeit ook door R4. Over deze laatste weerstand wordt een spanning opgewekt (variërend rond 1/2 Ub), die we op de uitgang terugvinden. De instelspanning wordt door middel van C2 in de schakeling vastgehouden.
Aan de uitgang vinden we de geïnverteerde en versterkte ingangswisselspanning.
Een nadeel van dit systeem is dat we koppelcondensatoren tussen de diverse trappen van een systeem moeten gebruiken. Gelijkspanningen kunnen dus niet zonder meer worden verwerkt! Het zal verder duidelijk zijn dat we het netwerkje R1-R2-C1 slechts éénmaal moeten opbouwen. Alle op-amp's in een schakeling kunnen met deze ene hulpspanning ingesteld worden.



Figuur 3/97.31-2: Het verloop van de spanningen in de schakeling van figuur 3/97.31-1.

97.31 Geen einde, maar hopelijk een begin!